

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Studium modulačních formátů a linkových kódů pro  
bezvláknové atmosférické spoje**

**Study of Modulation Formats and Link Codes for Free Space  
Optics**

**2015**

**Bc. Jozef Jendrisek**

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Jozef Jendrisek**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Studium modulačních formátů a linkových kódů pro bezvláknové  
atmosférické spoje  
Study of Modulation Formats and Link Codes for Free Space Optics

Zásady pro vypracování:

1. Bezvláknové optické komunikace FSO je stále se rozvíjející oblast. Tyto optické komunikace mají řadu výhod oproti rádiovým komunikacím a mají potenciál v budoucnu nahradit některé rádiové spoje. Zabývejte se FSO a prostudujte modulační formáty a linkové kódy vhodné pro venkovní a vnitřní optické bezvláknové atmosférické spoje.
2. Sestavte komunikační spojení s vybranými modulačními formáty a linkovými kódy ve vhodném programu. V tomto programu testujte vliv vybraných atmosférických jevů na toto komunikační spojení.
3. Vytvořte celkový přehled vlivu atmosférických jevů na komunikační spojení.
4. V praktické části proměřte vliv vybraných atmosférických jevů na modulovaný optický svazek.
5. Naměřené výsledky zhodnoťte.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] MAJUMDAR, A. K. a J. C. RICKLIN. *Free Space Laser Communications: Principles and Advances*. New York: Springer, 2008. ISBN 978-0-387-28652-5.
- [2] ARNON, S., J. BARRY a G. KARAGIANNIDIS. *Advanced Optical Wireless Communication Systems*. Cambridge: Cambridge Press, 2012. ISBN 9780521197878.
- [3] BASS, M, C. DECUSATIS, J. ENOCH, V. LAKSHMINARAYANAN, G. LI, C. MACDONALD, V. MAHAJAN a E. VAN STRYLAND. *Handbook of Optics, Third Edition Volume V: Atmospheric Optics, Modulators, Fiber Optics, X-Ray and Neutron Optics*. New York: McGraw-Hill Professional, 2009. ISBN 978-0071633130.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Vitásek**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: *4. mája 2015*



.....  
podpis študenta

## **Pod'akovanie**

Rád by som poďakoval Ing. Jánovi Vitáskovi Ph.D. za jeho odbornú pomoc a konzultácie pri vytváraní tejto diplomovej práce. Ďalej by som rád poďakoval Ing. Radkovi Martinkovi Ph.D. za konzultácie ohľadom prístrojov USRP.



## **Abstrakt**

Diplomová práca sa zaoberá modulačnými formátmi a linkovými kódmi pre bezvláknové optické spojenia. Práca obsahuje praktické merania s moduláciami PSK a QAM a simulácie modulácii QPSK, 4-QAM a OOK s linkovými kódmi NRZ a RZ v softvéri Optisystem. Optický zväzok bol v praktickom meraní modulovaný pomocou prístrojov USRP. Uvedené modulácie boli vybrané z dôvodu ich stále častejšieho nasadzovania vo vláknovej optike, a preto bolo zámerom testovať ich správanie vo FSO komunikáciách. Modulácia OOK stále patrí medzi veľmi často používané modulácie a v tejto práci slúži ako základ pre porovnanie s PSK a QAM moduláciami.

## **Kľúčové slová**

optický zväzok; FSO; modulácia; BER; MER; diagram oka; simulácia; PSK; QAM; OOK; RZ; NRZ; atmosféra; útlm; prenosová rýchlosť; turbulencia

## **Abstract**

Diploma thesis deals with modulation formats and line codes for free space optics. The thesis contains practical measurements with modulations PSK and QAM in optical wireless connection. It also contains simulations of QPSK and 4-QAM in the software Optisystem. The optical beam was modulated and demodulated using USRP devices in practical measurements. These modulations have been selected because of their more frequent deployment in fiber optics and therefore it is intended to test their behavior in FSO communications. OOK modulation is still commonly used modulation and in this thesis serves as a basis for comparison with PSK and QAM modulations.

## **Key words**

optical beam; FSO; modulation; BER; MER; eye diagram; simulation; PSK; QAM; OOK; RZ; NRZ; atmosphere; attenuation; bit rate; turbulence

## Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$\sigma_R$	-	Rayleighov rozptyl
$n$	-	Index lomu
$N$	-	Hustota molekúl
$\lambda$	m	Vlnová dĺžka
$\delta$	-	Depolarizačný faktor
$l_0$	m	Vnútna mierka
$L_0$	m	Vonkajšia mierka
$R_0$	$W.m^{-2}$	Lambertovská intenzita
$m_l$	-	Lambertovo módové číslo
$\varphi$	rad	Uhol vyžiareného výkonu
$S$	$W.m^{-2}$	Intenzita ožiarenia
$\psi$	rad	Uhol dopadu
$A_r$	$m^2$	Aktívna plocha
$g$	-	Zisk
$f$	Hz	Frekvencia
$m_i$	-	Stredná hodnota
$\sigma_i$	-	Smerodajná odchýlka
$\sigma^2$	-	Rozptyl
$P_0$	-	Pravdepodobnosť zámeny 0 za 1
$P_1$	-	Pravdepodobnosť zámeny 1 za 0
$n_e$	-	Počet chybných prijatých bitov
$N_B$	-	Počet všetkých prenesených bitov
$t_{un}$	s	Celkový čas nedostupnosti
$t_{total}$	s	Celkový čas spojenia

$R_b$	$\text{bit.s}^{-1}$	Prenosová rýchlosť
$T_b$	s	Periódá bitu
$P_R$	W	Priemerný výkon prijímača
$\gamma_T$	dB	Celkový útlm kanálu
$h$	$\text{J.s}^{-1}$	Plancková konštanta
$c$	$\text{m.s}^{-1}$	Rýchlosť svetla
$\eta$	-	Kvantová účinnosť
$T_s$	s	Trvanie slotu
$M$	-	Počet možných symbolov
$D_T$	s	Oneskorenie šírenia
$H_0$	-	Nulová Hypotéza
$H_A$	-	Alternatívna hypotéza
$C_n^2$	$\text{m}^{-2/3}$	Štrukturálny parameter indexu lomu

## Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
<b>ADSL</b>	Asynchronous Digital Subscriber Link	Asynchrónna Digitálna Účastnícka Linka
<b>AM</b>	Amplitude Modulation	Amplitúdová Modulácia
<b>APD</b>	Avalanche Photodiode	Lavínová Fotodióda
<b>ASK</b>	Amplitude Shift Keying	Kľúčovanie Amplitúdovým Posuvom
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise	Aditívny Biely Gaussovský Šum
<b>BER</b>	Bit Error Rate	Bitová chybovosť
<b>BPF</b>	Band-Pass Filter	Pásmová Prepust'
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying	Binárne Kľúčovanie Fázovým Posuvom
<b>CW</b>	Continual Wave	Kontinuálna Vlna
<b>DA</b>	Digital-to-Analog	Digitálne – Analógový
<b>DD</b>	Direct Detection	Priama Detekcia
<b>DH-PIM</b>	Double Header – Pulse Interval Modulation	Impulzná Intervalová Modulácia s Dvojitou Hlavičkou
<b>DPIM</b>	Digital Pulse Interval Modulation	Digitálna Impulzná Intervalová Modulácia
<b>DPPM</b>	Differential Pulse Position Modulation	Diferenciálna Impulzná Polohová Modulácia
<b>DQPSK</b>	Differential Quadrature Phase Shift Keying	Diferenciálne Kvadrátúrne Kľúčovanie Fázovým Posuvom
<b>DWDM</b>	Dense Wavelength Division Multiplex	Hustý Vlnový Multiplex
<b>ES</b>	Errored Second	Chybná sekunda
<b>FLI</b>	Fluorescence Light Irradiance	Fluorescenčné Svetelné Žiarenie
<b>FM</b>	Frequency Modulation	Frekvenčná Modulácia
<b>FOV</b>	Field Of View	Zorné Pole
<b>FSO</b>	Free Space Optics	Bezvláknová Optika

<b>GS</b>	Guard Slot	Ochranný Slot
<b>HPF</b>	High Pass Filter	Filter Horná Prepust'
<b>IM</b>	Intensity Modulation	Intenzitná Modulácia
<b>ISI</b>	Intersymbol Interference	Medzisymbolová Interferencia
<b>LAN</b>	Local Area Network	Lokálna sieť
<b>LD</b>	Laser diode	Laserová Dióda
<b>LED</b>	Light Emitting Diode	Svetlo Emitujúca Dióda
<b>LOS</b>	Line Of Sight	Priama Viditeľnosť
<b>MER</b>	Modulation Error Ratio	Pomer Chyby Modulácie
<b>ML</b>	Maximum Likelihood	Maximálna pravdepodobnosť
<b>MPPM</b>	Multilevel Pulse Position Modulation	Viacúrovňová Impulzná Polohová Modulácia
<b>MPSK</b>	M-array Phase Shift Keying	M-stavové Kľúčovanie Fázovým Posuvom
<b>NOPR</b>	Normalized Optical Power Requirement	Normalizované požiadavky na optický výkon
<b>NRZ</b>	Non Return to Zero	Bez návratu k Nule
<b>OOK</b>	On-Off Keying	On-Off Kľúčovanie
<b>OPP</b>	Optical Power Penalty	Optický Výkonový Postih
<b>PAM</b>	Pulse Amplitude Modulation	Impulzná Amplitúdová Modulácia
<b>PIM</b>	Pulse Interval Modulation	Impulzná Intervalová Modulácia
<b>PPM</b>	Pulse Position Modulation	Impulzná Polohová Modulácia
<b>PSK</b>	Phase Shift Keying	Kľúčovanie Fázovým Posuvom
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation	Impulzná Šírková Modulácia
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation	Kvadrátúrna Amplitúdová Modulácia
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying	Kvadrátúrne Kľúčovanie Fázovým Posuvom
<b>RF</b>	Radio Frequency	Rádiové Frekvencie
<b>RMS</b>	Root Mean Square	Kvadratický Priemer
<b>RZ</b>	Return to Zero	S návratom k Nule

<b>SES</b>	Severely Errored Second	Veľmi Chybné Sekundy
<b>SI</b>	Symbol Interference	Symbolová interferencia
<b>SIM</b>	Subcarrier Intensity Modulation	Intenzitná Modulácia Subnosnej
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio	Odstup Signálu od Šumu
<b>USRP</b>	Universal Software Radio Peripheral	Univerzálne Softvérové Rádiové Rozhranie

# Obsah

Úvod .....	- 16 -
1 Úvod do bezvláknových optických spojov .....	- 17 -
1.1 Stručná história optických komunikácií .....	- 17 -
1.2 Využitie bezvláknovej optiky .....	- 17 -
1.3 Limity použitia FSO .....	- 18 -
1.4 Základný popis bezvláknového optického spojenia .....	- 19 -
1.5 Výhody a nevýhody bezvláknovej optiky .....	- 19 -
1.5.1 Výhody bezvláknovej optiky .....	- 19 -
1.5.2 Nevýhody bezvláknovej optiky .....	- 19 -
2 Atmosférické javy .....	- 20 -
2.1 Molekulová absorpcia .....	- 20 -
2.2 Rozptyl .....	- 21 -
2.2.1 Rayleighov rozptyl .....	- 21 -
2.2.2 Mieov rozptyl .....	- 22 -
2.3 Atmosférická turbulencia .....	- 22 -
2.4 Scintilácia .....	- 23 -
2.5 Faktory ovplyvňujúce FSO .....	- 24 -
2.5.1 Dážď .....	- 24 -
2.5.2 Sneženie .....	- 24 -
2.5.3 Hmla .....	- 24 -
2.5.4 Viditeľnosť .....	- 24 -
2.5.5 Vzdialenosť .....	- 25 -
2.5.6 Šírka pásma .....	- 25 -
2.5.7 Parazitné svetlo .....	- 26 -
3 Štatistické modely atmosférických kanálov .....	- 27 -
3.1 Vnútorne FSO komunikačné kanály .....	- 27 -
3.1.1 LOS model šírenia .....	- 28 -
3.1.2 Non-LOS model šírenia .....	- 29 -
3.2 Vonkajšie FSO komunikačné kanály .....	- 29 -



3.2.1	Log-normálny model .....	- 29 -
3.2.2	Gama-Gama model .....	- 30 -
3.2.3	Negatívne exponenciálny model .....	- 31 -
3.2.4	K model .....	- 31 -
3.2.5	I-K model.....	- 31 -
4	Parametre FSO spojenia .....	- 32 -
4.1	Stacionárne parametre .....	- 32 -
4.1.1	Energetická bilancia FSO spojenia .....	- 32 -
4.1.2	Prenosové rýchlosti.....	- 32 -
4.1.3	Dosah spojenia.....	- 32 -
4.1.4	Bitová chybovosť (BER) .....	- 32 -
4.2	Štatistické parametre.....	- 33 -
4.2.1	Dostupnosť FSO spojenia .....	- 33 -
5	Linkové kódy využívané vo FSO komunikáciách .....	- 35 -
5.1	Non-Return-to-Zero .....	- 35 -
5.2	Return-to-Zero .....	- 36 -
5.3	Manchester .....	- 36 -
6	Modulačné techniky používané vo vonkajších FSO spojeniach .....	- 38 -
6.1	On-Off Kľúčovanie (OOK) .....	- 39 -
6.1.1	Základy OOK vo FSO komunikáciách .....	- 39 -
6.1.2	NRZ-OOK .....	- 40 -
6.1.3	RZ-OOK .....	- 41 -
6.1.4	OOK v Poissonovom atmosférickom optickom kanáli .....	- 42 -
6.1.5	OOK Gaussovom atmosférickom optickom kanáli .....	- 43 -
6.2	Kľúčovanie Fázovým Posunom (PSK) .....	- 44 -
6.2.1	Binárne kľúčovanie fázovým posunom (BPSK) .....	- 44 -
6.2.2	M-stavové kľúčovanie fázovým posunom (MPSK).....	- 44 -
6.2.3	Kvadratúrne kľúčovanie fázovým posunom (QPSK).....	- 45 -
6.2.4	Diferenciálna QPSK .....	- 45 -
6.3	Kvadratúrna Amplitúdová Modulácia (QAM).....	- 46 -
6.4	Impulzná Polohová Modulácia (PPM).....	- 47 -

6.4.1	Varianty PPM .....	- 49 -
6.5	Impulzná amplitúdová modulácia (PAM) .....	- 50 -
6.6	Impulzná šírková modulácia (PWM) .....	- 51 -
6.7	Impulzná intervalová modulácia (PIM) .....	- 51 -
6.7.1	DPIM .....	- 51 -
6.7.2	DH-PIM .....	- 52 -
6.8	Intenzitná Modulácia Subnosnej (SIM) .....	- 53 -
6.8.1	SIM generovanie a detekcia .....	- 54 -
7	Modulačné techniky používané vo vnútorných FSO spojeniach .....	- 57 -
7.1	Porovnanie OOK, PPM a DPIM za prítomnosti FLI s použitím HPF .....	- 58 -
7.2	Výkonnosť spojenia pri viacestnom šírení .....	- 60 -
8	Testovanie vplyvu turbulencií na vybrané modulácie .....	- 64 -
8.1	Zapojenie meracieho pracoviska a nastavenie prístrojov .....	- 64 -
8.2	Výsledky testovania modulácií .....	- 67 -
8.2.1	Modulácia QAM .....	- 68 -
8.2.2	Modulácia PSK .....	- 72 -
8.3	Súhrnné porovnanie testovaných modulácií .....	- 77 -
9	Testovanie vplyvu hmly na vybrané modulácie .....	- 78 -
9.1	Zapojenie meracieho pracoviska a nastavenie prístrojov .....	- 78 -
9.2	Výsledky testovania vplyvu hmly na modulovaný signál .....	- 80 -
10	Simulovanie vplyvu atmosférických podmienok na modulovaný optický zväzok .....	- 85 -
10.1	Testovanie modulácie OOK .....	- 85 -
10.1.1	Výsledky simulácií OOK modulácie na vlnovej dĺžke 1550 nm .....	- 86 -
10.1.2	Výsledky simulácií OOK modulácie na vlnovej dĺžke 850 nm .....	- 91 -
10.1.3	Zhrnutie výsledkov simulácií pre moduláciu OOK .....	- 95 -
10.2	Modulácia QPSK .....	- 96 -
10.2.1	Výsledky simulácií QPSK modulácie na vlnovej dĺžke 1550 nm .....	- 96 -
10.2.2	Výsledky simulácií QPSK modulácie na vlnovej dĺžke 850 nm .....	- 100 -
10.3	Modulácia 4-QAM .....	- 104 -
10.3.1	Výsledky simulácií 4-QAM modulácie na vlnovej dĺžke 1550 nm .....	- 105 -
10.3.2	Výsledky simulácií 4-QAM modulácie na vlnovej dĺžke 850 nm .....	- 109 -

Záver .....	- 113 -
Použitá literatura .....	- 115 -
Seznam příloh .....	- 119 -

## Úvod

V súčasnosti je vláknová optika veľmi rozšírená, postupne nahradzuje metalické spojenia. Toto všetko sa deje z jednoduchých dôvodov. Prenosové rýchlosti sa stále zvyšujú a optické komunikácie poskytujú dostatočnú šírku pásma pre takéto zvyšovanie. Ďalším významným dôvodom je, že svetlo je odolné na elektromagnetické rušenie. Je snahou všetky tieto výhody vláknových optických komunikácií využiť aj v bezvláknovej optike. Bezvláknová optika vytvára alternatívu veľmi rozšírenej bezdrôtovej technológii WiFi. Bezvláknové optické spojenia môžu byť využívané v niekoľkých konfiguráciách, či už sa jedná o smerové komunikácie typu bod-bod alebo nesmerové komunikácie, ktoré by mohli byť použité vo vnútorných priestoroch a nahradiť či doplniť rádiové komunikácie.

Samozrejme žiadna technológia nie je dokonalá. Nasadzovanie bezvláknových optických spojení v atmosfére nie je jednoduché z dôvodu rôznych atmosférických vplyvov ako je rozptyl, absorpcia a turbulencie. Najväčším problémom spomedzi poveternostných podmienok je hmla, ktorá spôsobuje veľký útlm v optickom spojení. Ďalším problémom je, že prenosové prostredie tvorené atmosférou je prakticky nepredvídateľné a stále mení svoje zloženie a vlastnosti. Vytvárajú sa v ňom rôzne turbulencie, ktoré spôsobujú zmeny indexu lomu pozdĺž prenosovej trasy a tým degradujú kvalitu spojenia. Inými slovami povedané, znižujú jeho dosah. Chovanie atmosféry je popísané mnohými matematickými a štatistickými modelmi, z ktorých niektoré sú popísané v tejto práci.

Na zvýšenie odolnosti bezvláknových optických spojení sú vyvíjané a testované rôzne typy modulácií a linkových kódov. Práca obsahuje teoretický popis niektorých z nich, ktoré sú používané v bezvláknovej optike. V práci sú taktiež popísané linkové kódy, ktoré sú najčastejšie používané. Jedna kapitola je venovaná aj bezvláknovým optickým spojeniam vo vnútorných priestoroch a obsahuje aj porovnanie, ktoré sú v tomto prostredí používané.

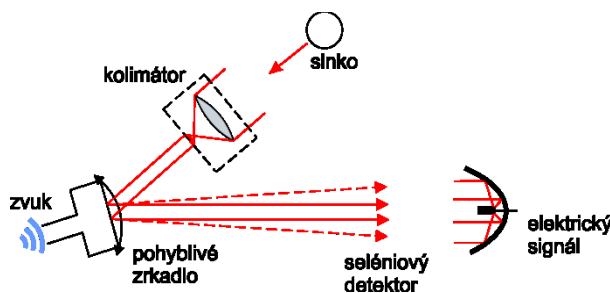
Praktická časť obsahuje merania vplyvu atmosférických podmienok ako sú turbulencie alebo útlm spôsobený sublimáciou suchého ľadu. Prostredie, ktoré táto sublimácia vytvorí je podobné prostrediu s hmlou. Optické spojenie je vytvorené pomocou komponentov od spoločnosti Thorlabs a optický zväzok je modulovaný a demodulovaný pomocou prístrojov USRP. Na ovládanie týchto prístrojov sú použité aplikácie vytvorené v softvéri Labview. Použité modulácie sú: QPSK, 8-PSK, 4-QAM a 8-QAM. Kvalita spojenia a vplyv turbulencií či suchého ľadu je vyhodnocovaný pomocou parametra MER.

Poslednú časť práce tvoria simulácie, pomocou ktorých sú najprv porovnané linkové kódy použité spolu s moduláciou OOK. Porovnanie je založené na dosahu spojenia, ktorého je možné s každým linkovým kódom možné dosiahnuť. Druhá časť simulácií patrí porovnaniu modulácií QPSK a 4-QAM s OOK moduláciou s NRZ linkovým kódom. Výsledky simulácií sú vyhodnocované pomocou hodnôt BER a pomocou diagramov oka. Na záver práca obsahuje zhodnotenie nameraných a nasimulovaných výsledkov.

# 1 Úvod do bezvláknových optických spojov

## 1.1 Stručná história optických komunikácií

Využitie svetla pre komunikáciu nie je novodobá záležitosť. Už starí Rímanovia využívali veľké leštené kovové pláty, pomocou ktorých odrážali slnečné lúče a tým mohli signalizovať na veľké vzdialenosti. Blikanie svetlom ako prenos správ je využívané loďami už celé stáročia. Alexander Graham Bell uskutočnil experiment so svojím Fotofónom (obrázok 1.1), kde použil slnečné svetlo odrazené vibrujúcim zrkadlom a selénovú foto bunku na odoslanie kvazi-telefónneho signálu na vzdialenosť 183 metrov.



Obrázok 1.1: Fotofón Alexandra Grahama Bella

Nasledujúcu prvú demonštráciu funkčného laseru v roku 1960 v Hughes Research Laboratories v Malibu, bol prvý vážny vývoj FSO laserovej komunikácie nazvaný "Lightphone". Počas obdobia veľkého rozmachu optických vlákien, ostala technológia FSO laserovej komunikácie trochu v pozadí, avšak vo vojenských a vesmírnych laboratóriách sa vývoj nikdy úplne nezastavil.

V posledných tridsiatich rokoch došlo k obrovským pokrokom na poli elektro-optiky a opto-elektroniky. To všetko najmä vďaka vojenským projektom, ktoré finančne podporovali vývoj bezvláknovej optiky, či už z hľadiska komunikácie alebo obrany. [1][2]

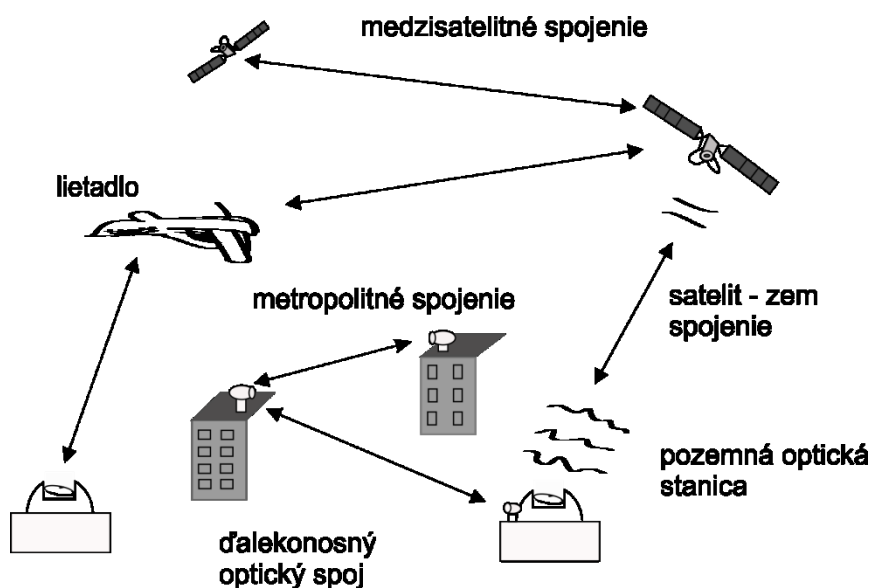
## 1.2 Využitie bezvláknovej optiky

V súčasnosti sa bezvláknové optické komunikačné systémy vyvíjajú z dôvodu rastu potreby systémov dosahujúcich vysoké prenosové rýchlosti a maximálne zabezpečenie. Pre spojenia obsahujúce satelity, vesmírne sondy, pozemné stanice, letectvo a mnoho ďalších, je preto táto oblasť veľmi zaujímavá. A čo viac, väčšina týchto spojení môže byť použitá tak pre vojenské účely, ako aj pre civilné. Typické scenáre, kde môže byť bezvláknová optika využitá sú:

- LAN-LAN spojenia v kampusoch na Fast-Ethernetových a Gigabit-Ethernetových rýchlostiach
- LAN-to-LAN spojenia v mestách
- Rýchle poskytovanie služieb s veľkou šírkou pásma pre prístup do vláknových optických sietí

- Dočasné sieťové inštalácie (pre špeciálne alebo iné prípady)
- Rýchle znovu vytvorenie vysokorýchlostného spojenia (pri katastrofách alebo núdzových situáciách)
- Komunikácie medzi zemou a vesmírnymi loďami, medzi vesmírnymi loďami navzájom, vrátane prvkov satelitov
- Medzihviezdna komunikácia
- Medzi-loďná komunikácia s vysokou prenosovou rýchlosťou, poskytujúca kompletne zaezpečenie

Obrázok 1.2 zobrazuje architektúry bezvláknových optických spojení pre zem - zem, zem - vzduch, vzduch - zem a vzduch - vzduch spojenia. Tieto spojenia môžu obsahovať napríklad, metropolitné siete využívajúce vzduch - vzduch laserovú komunikáciu medzi budovami, spojenie na veľku vzdialenosť medzi pozemnou optickou stanicou a budovou alebo satelitom, alebo medzi-satelitné spojenie. Ďalšou oblasťou záujmu je širokopásmové bezdrôtové riešenie pre tzv. poslednú míľu v metropolitných sieťach.[1]



Obrázok 1.2: Rôzne architektúry pre bezvláknovú optickú komunikáciu

### 1.3 Limity použitia FSO

Zatiaľ čo pevné FSO spojenia medzi budovami sú už dlho zavedené a dnes tvoria osobitný komerčný segment v lokálnych a metropolitných sieťach, mobilné FSO aplikácie a FSO aplikácie na dlhú vzdialenosť sa stretávajú s extrémnymi požiadavkami na presnosť smerovania optického laseru. Je to z dôvodu, že optickú lúč je veľmi úzky a len malé pochybenie pri umiestnení a natočení vysielača môže spôsobiť, že daný lúč minie prijímač a tým sa spojenie nenaviaže. Táto výzva musí byť dokonale splnená aby bolo možné využiť všetky výhody bezvláknového optického spojenia. [2]

V množstve prípadov praktického využitia, je limitujúcim faktorom spoľahlivej optickej komunikácie stála prítomnosť optických turbulencií v atmosférickom kanále. Iné atmosférické efekty, ktoré môžu degradovať výkon sú absorpcia a rozptyl laserového lúča. Ďalším limitom komunikácie využívajúcej svetelný lúč je potreba aby bola zachovaná priama viditeľnosť medzi laserovým vysielačom a prijímačom, pretože, ako je známe, svetlo nemôže prechádzať cez stromy, kopce, budovy a podobne. Ďalším obmedzením, avšak niekedy prehliadaným, je uloženie vysielača a prijímača vzhľadom k slnku, a to tak aby nebol prijímač natočený do slnka.

### 1.4 Základný popis bezvláknového optického spojenia

Cieľom komunikačného systému je prenos dát alebo informácie zo zdroja v jednom bode do prijímača v druhom bode cez atmosférický kanál s prijateľnou chybovosťou, pričom je zabezpečená vysoká spoľahlivosť. Vysielač sa v podstate skladá z laseru, modulátoru (so zvolenou moduláciou), ovládanie laseru a teleskop. V závislosti na použítom modulačnom formáte, modulátor konvertuje bity informácie na elektrický signál a moduluje laser aby generoval príslušný optický signál. Teleskop zväčší rádius optického lúča, aby sa znížili difrakčné efekty, ktoré rozširujú lúč.

Optický signál je šírený atmosférickým kanálom a následne zbieraný prijímačom pre získanie prenášaných dát. Prijímač sa skladá z teleskopu, detektoru a dekodéru. Teleskop zbiera optický signál a zmenšuje lúč tak aby bola jeho veľkosť vhodná na prijatie detektorom. Detektor konvertuje optický signál späť na elektrický signál. Prevažne pri priamych detekčných systémoch, sa prijímač skladá z fotodetektoru s lavínovou fotodiódou (APD), filtra zhody, ktorý je implementovaný vo forme pohyblivého integrátora, a časovaný komparátor. Časovaný komparátor vykonáva prahový test na hraniciach bitových intervalov. [1]

### 1.5 Výhody a nevýhody bezvláknovej optiky

#### 1.5.1 Výhody bezvláknovej optiky

- Veľká šírka pásma
- Bezlicenčné využitie
- Oproti vláknovej optike je jednoduchšia a lacnejšia
- Vysoká prenosová rýchlosť
- Žiadne rušenie signálu rádiovými frekvenciami

#### 1.5.2 Nevýhody bezvláknovej optiky

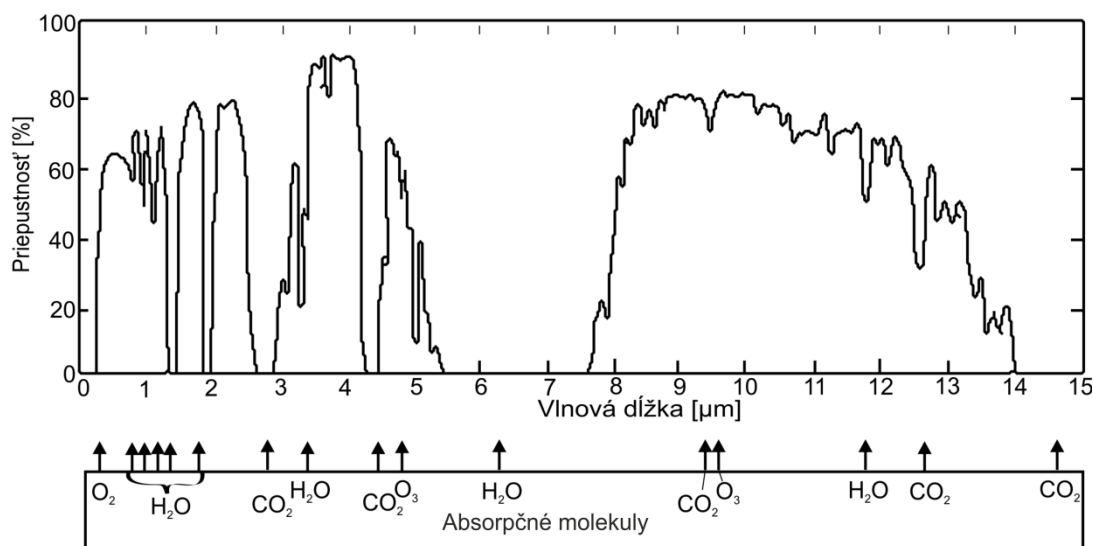
- Atmosférické javy spôsobujúce absorpciu, rozptyl a odrazy (napr. hmla)
- Fyzické prekážky
- Scintilácia, teda teplo stúpajúce zo zeme, ktoré môže rušiť signál
- Bezpečnostné rizika kvôli použitiu laserov

## 2 Atmosférické javy

Množstvo faktorov ovplyvňuje výkon FSO systému. Je preto dôležité brať v úvahu tieto faktory a ich efekty na výkon systému už pri návrhu daného systému tak, aby bol dosiahnutý maximálny výkon. Najviac pôsobí na optický zväzok absorpcia, rozptyl a turbulencia. [9][10]

### 2.1 Molekulová absorpcia

Absorpcia optického žiarenia molekulami v atmosfére primárne súvisí s jednotlivými optickými absorpčnými prechodmi medzi povolenými kvantovými energetickými hladinami v molekule.[10] Útlm spôsobený molekulovou absorpciou je výsledkom interakcie medzi optickým žiarením a atómami a molekulami atmosféry ( $N_2, O_2, H_2, H_2O, \text{atd'}$ ). Absorpčný koeficient závisí na type molekúl plynov a ich koncentrácii. Spektrálne zmeny v absorpčnom koeficiente určujú absorpčné spektrum. Charakter tohto spektra je z dôvodu zmien možných energetických hladín vo vnútri plynnej masy v podstate vytváraný elektronickými prechodmi, vibráciami atómov a rotáciami molekúl. Zvyšovanie tlaku alebo teploty inklinuje k rozšíreniu absorpčným čiar excitáciou nových energetických hladín a Dopplerovým efektom. Molekulová absorpcia je selektívny fenomén, ktorého výsledkom je prenosové spektrum atmosféry. Toto spektrum tvoria transparentné zóny, nazývané atmosférické prenosové okná, a nepriepustné zóny, ktoré sa nazývajú atmosférické blokovacie okná. Tieto okná sú zobrazené na obrázku 2.1.



Obrázok 2.1: Prenosové spektrum atmosféry

Ako je spomenuté vyššie, absorpcia optického žiarenia molekulami v atmosfére súvisí s prechodmi medzi kvantovými hladinami v molekule. Každý druh plynnej molekuly má presne špecifikované energetické hladiny. Tie môžu pod vplyvom okamžitého elektromagnetického žiarenia absorbovať energiu (alebo fotóny) a spôsobia teda prechod z počiatočnej energetickej



hladiny  $e_i$  na vyššiu energetickú hladinu  $e_i$ . Počiatočná vyžiarená energia je potom utlmená stratou jedného alebo viacerých fotónov.

Tento proces sa vyskytuje len vtedy ak frekvencia okamžitej vlny presne korešponduje s jednou z rezonančných frekvencií danej molekuly. [11]

## 2.2 Rozptyl

Rozptyl svetla môže dramaticky vplývať na výkon FSO systémov. Rozptyl nie je spojený so stratou energie v dôsledku procesu absorpcie svetla. Lepšie je ho chápať ako presmerovanie alebo odklonenie svetla, čo môže viesť k značnému poklesu prijatej intenzity svetla na prijímacej strane. V atmosfére sú dôležité dva druhy rozptylu [9]:

- Rayleighov rozptyl
- Mieov rozptyl

### 2.2.1 Rayleighov rozptyl

Rayleighov rozptyl je elastický rozptyl optického žiarenia v dôsledku slabo viazaného elektronického oblaku obklopujúceho molekuly plynu, ktoré sú ovplyvnené dopadajúcim elektromagnetickým poľom. Rayleighov rozptyl nastáva v prípade, že vlnová dĺžka dopadajúceho svetla je omnoho dlhšia než je priemer častice. To znamená, že Rayleighov rozptyl nastáva na molekulách. Tento rozptyl spôsobuje, že farba oblohy je modrá a vychádzajúce alebo zapadajúce slnko je červené. Rayleighov diferenciálny rozptylový koeficient je daný vzťahom

$$\frac{d\sigma_R}{d\Omega} = \left[ \frac{\pi^2(n^2-1)^2}{N^2\lambda^4} \right] [\cos^2\varphi \cos^2\theta + \sin^2\varphi], \quad (2.1)$$

kde  $n$  je index lomu atmosféry,  $N$  je hustota molekúl,  $\lambda$  je vlnová dĺžka optického žiarenia,  $\varphi$  a  $\theta$  sú súradnicové sférické uhly rozptýleného polarizovaného svetla vztiahnuté k smeru dopadu svetla. Z rovnice (2.1) vyplýva, že svetlo s kratšou vlnovou dĺžkou je viac rozptýlené ako svetlo s väčšou vlnovou dĺžkou.

Celkový Rayleighov rozptylový koeficient pre priestorový uhol  $4\pi$  je daný vzťahom

$$\sigma_R = \left[ \frac{8}{3} \right] \left[ \frac{\pi^2(n^2-1)^2}{N^2\lambda^4} \right], \quad (2.2)$$

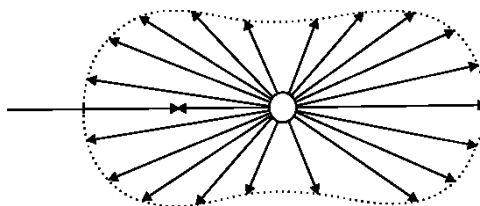
alebo zjednodušene

$$\sigma_R = \frac{1,04 \cdot 10 (n-1)^2}{\lambda^4}. \quad (2.3)$$

Rayleighov rozptyl je potom daný vzťahom

$$\alpha_R(\lambda)N(x,t) = N\sigma_R. \quad (2.4)$$

Pre nepolarizované svetlo sa používa depolarizačný faktor  $\delta$ , ktorý je daný pomerom dvoch ortogonálne polarizovaných spätno rozptýlených intenzít. [10]

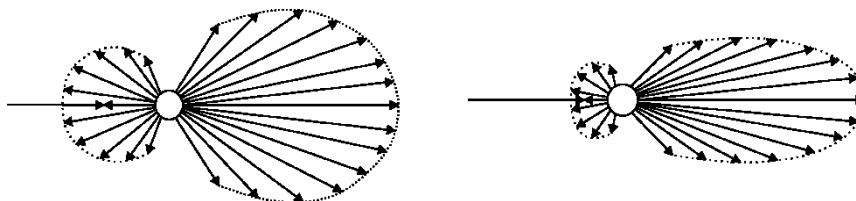


Obrázok 2.2: Rayleighov rozptyl

### 2.2.2 Mieov rozptyl

Mieov rozptyl je podobný Rayleighovmu rozptylu, rozdielom je veľkosť častice v porovnaní s vlnovou dĺžkou. Mieov rozptyl je tiež elastický. V predchádzajúcom prípade bola veľkosť častice menšia než vlnová dĺžka svetla. Teraz je veľkosť častíc porovnateľná s vlnovou dĺžkou svetla. Mieov rozptyl, je teda prevažne spôsobený aerosólmi a jemnými časticami v atmosfére. Rozptýlené žiarenie má rovnakú vlnovú dĺžku ako dopadajúce svetlo. Avšak, dochádza tu k zložitejšej interakcii medzi časticami a dopadajúcim svetlom, než tomu bolo pri Rayleighovom rozptyle.

Mie pri pokusoch pozoroval asymetriu medzi priamymi a spätnými smermi. Pre veľké častice dominoval priamy smer. Vytvoril sa veľký predný lalok a postranné laloky sú malé. Ak je veľkosť častíc menšia než vlnová dĺžka svetla, potom sa spätný lalok zväčší a postranné vymiznú. V prípade, že veľkosť častice dosahuje desatinu vlnovej dĺžky svetla, predný a spätný lalok sú symetrické.



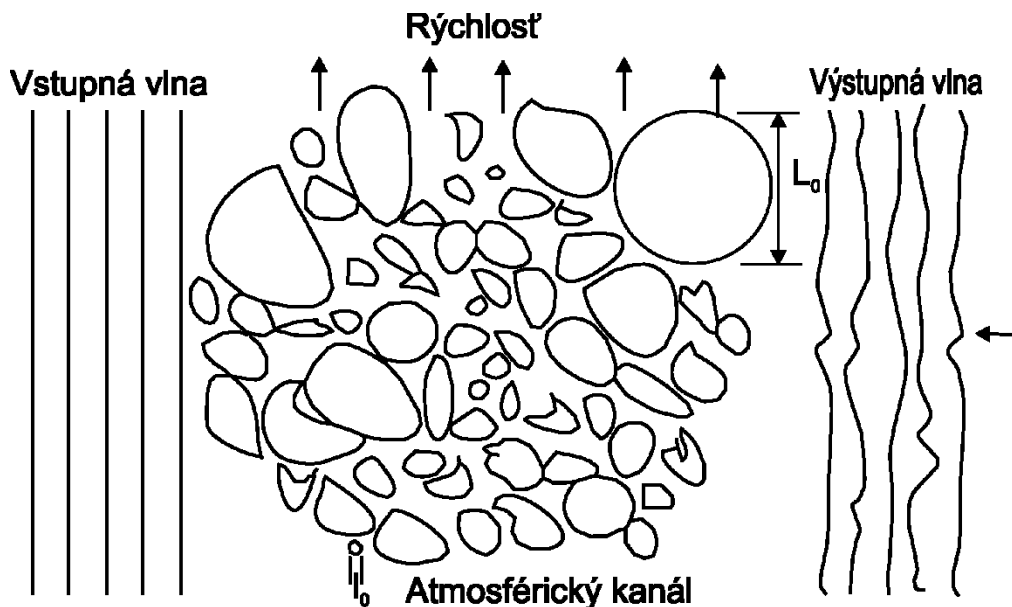
Obrázok 2.3: Mieov rozptyl

## 2.3 Atmosférická turbulencia

Atmosférická turbulencia je spôsobená náhodnými zmenami teploty a tlaku v oblasti atmosféry, cez ktorú má prechádzať FSO signál. Toto je jeden z problémov, ktorý nemožno úplne odstrániť, pretože závisí na časti dňa a ako je známe, teplota je zväčša kontrolovaná slnkom.[3]

Atmosférická turbulencia spôsobuje náhodné zmeny indexu lomu atmosféry pozdĺž trasy optického poľa/žiarenia prechádzajúceho atmosférou. Táto zmena indexu lomu je priamym produktom náhodných zmien teploty atmosféry z bodu do bodu. Tieto náhodné teplotné zmeny sú funkciou atmosférického tlaku, nadmorskej výšky a rýchlosti vetra. Najmenšie, resp. najväčšie turbulentné víry sú označované ako vnútorná mierka  $l_0$ , resp.

vonkajšia mierka  $L_0$  turbulencie.  $l_0$  je typický v radovo pár milimetrov, kým  $L_0$  je typický radovo niekoľko metrov. Tieto slabé kvázi šošovky zobrazené na obrázku 2.4, ktorých výsledkom je náhodný interferenčný efekt medzi rôznymi oblasťami šíriaceho sa lúča, spôsobujú skreslenie vlny. [6]



Obrázok 2.4: Atmosférický kanál s turbulentnými vírmi

V priebehu rokov, bolo pre popis úniku signálu z dôvodu atmosférickej turbulencie, navrhnutých množstvo štatistických modelov atmosférických kanálov. V tomto zmysle, bolo dokázané, že log-normálny model je dostatočne presný pre slabé turbulencie, gama-gama a I-K distribučný model pre slabé až silné turbulencie, zatiaľ čo K a negatívne exponenciálny model sú vhodné pre silné turbulencie. [12] Jednotlivé modely sú popísané v kapitole 3.

## 2.4 Scintilácia

Atmosférická scintilácia môže byť definovaná ako zmeny intenzity svetla v čase a priestore v rovine prijímača detegujúceho optický signál. V dôsledku zmien indexu lomu, ktoré nastávajú vplyvom zmien teploty vzduchu pozdĺž prenosovej trasy, vznikajú na detektore fluktuácie prijímaného signálu. Zmenami indexu lomu sa atmosféra chová ako séria malých šošoviek, ktoré vychyľujú časti svetelného lúča z a na určenú prenosovú trasu. Časové rozpätie týchto fluktuácií je v milisekundách, ktoré sú približne rovné času, ktorý zaberie objemu vzduchu veľkosti lúča prechod po trase. Preto je toto rozpätie úmerné rýchlosti vetra, ktorý pohybuje týmito šošovkami ako oblasťami vzduchu. Efekt scintilácie na optický signál bude najvyšší keď bude teplota cez deň na maxime, to nastáva zvyčajne v priebehu poludnia. FSO systémy, pracujúce v atmosfére horizontálne blízko zemského povrchu, čelia maximálnej novej scintilácii. Hodnoty indexu scintilácie sú využívané na výpočet SNR hodnôt, ktoré sú následne použité na výpočet BER hodnôt. [3]

## 2.5 Faktory ovplyvňujúce FSO

### 2.5.1 Dážď

Dážď vplyva na FSO spojenie tým, že znižuje jeho dosah. Napriek tomu je jeho vplyv menší ako pri hmle. Je tomu tak, pretože polomer dažďových kvapiek ( $200 - 2000 \mu\text{m}$ ) je značne väčší ako vlnová dĺžka typických svetelných zdrojov FSO spojenia. Typické hodnoty útlmu pri daždi sú mierneho charakteru. [9]

### 2.5.2 Sneženie

Snehové vločky sú vlastne ľadovými kryštálmi rôznych tvarov a veľkostí. Vo všeobecnosti však platí, že snehové vločky bývajú väčšie ako dažďové kvapky. Podmienky pri snehovej búrke môžu spôsobovať útlm lúča, ale rozptyl nebýva veľkým problémom, pretože veľkosť snehových vločiek je omnoho väčšia v porovnaní s používanými vlnovými dĺžkami. Vplyv slabého sneženia až fujavice a snehovej búrky, spadá približne medzi slabý dážď a stredne hustú hmlu, čo môže byť vyjadrené útlmom spojenia od  $3 \text{ dB/km}$  až po  $30 \text{ dB/km}$ . [9]

### 2.5.3 Hmla

Hmla je zo všetkých meteorologických javov najviac škodlivým javom pre FSO spojenia, pretože je zložená z malých vodných kvapiek s polomerom okolo veľkosti vlnových dĺžok blízkeho infračerveného pásma. [9] Principiálne, častice hmly znižujú viditeľnosť blízko zemského povrchu. Meteorologická definícia hmly je, že hmla nastáva, keď viditeľnosť klesne blízko jednému kilometru. Rôzne typy hmly spôsobujú rôzne veľké optické straty a to hlavne v závislosti na rozložení častíc hmly, ich veľkosti a polohe.

Existujú dva druhy hmly, konvektívna a advektívna. Konvektívna alebo tiež radiačná hmla je vytváraná v dôsledku ochladzovania zemského povrchu žiarením. Táto hmla sa objavuje keď je vzduch dostatočne chladný a stane sa nasýteným. Principiálne sa konvektívna hmla objavuje počas noci a na konci dňa s rozložením veľkosti častíc  $1 - 3 \mu\text{m}$  a obsahom kvapalnej vody medzi  $0,01$  a  $0,1 \text{ g/m}^3$ . Preto ovplyvňuje kratšie vlnové dĺžky (prvé a druhé prenosové okno) a okrajovo  $10 \mu\text{m}$  prenosové okno. Bežná viditeľnosť pre tento typ hmly je  $500 \text{ m}$ . Advektívna hmla je vytváraná pohybom masy vlhkého a teplého vzduchu nad chladnejším morským alebo zemským povrchom. Je charakteristická obsahom kvapalnej vody vyšším ako  $0,2 \text{ g/m}^3$  a priemer častíc je blízko  $20 \mu\text{m}$ . Pre advektívnu hmlu je bežná viditeľnosť  $200 \text{ m}$ . [7]

### 2.5.4 Viditeľnosť

Nízka viditeľnosť znižuje efektívnosť a dostupnosť FSO systémov. Dlhodobé pozorovania počasia ukázali, že niektoré mestá, ako je Seattle, majú nižšiu priemernú viditeľnosť než mestá ako Denver. To znamená, že pre tú istú vzdialenosť a ten istý FSO systém bude mať FSO spojenie v Denveri vyššiu dostupnosť ako systém inštalovaný v Seattli. [9] V tabuľke 2.1 sú zobrazené hodnoty viditeľnosti pre rôzne poveternostné podmienky.

Tabuľka 2.1: Poveternostné podmienky a ich hodnoty viditeľnosti [7]

Medzinárodné triedenie viditeľnosti					
Poveternostné podmienky	Zložky počasia [mm/h]			Viditeľnosť [m]	Útlm [dB/km]
Veľmi hustá hmla				50	315
Hustá hmla				200	75
Stredne hustá hmla				500	28,9
Riedka hmla	Sneh	Búrka	100	770	18,3
Veľmi riedka hmla				1 000	13,8
		Silný dážď	25	1 900	6,9
Ľahký opar				2 000	6,6
		Stredne silný dážď	12,5	2 800	4,4
Veľmi ľahký opar				4 000	3,1
		Ľahký dážď	2,5	5 900	2
				10 000	1,1
Jasno			Mrholenie	0,25	18 100
			20 000	0,54	
Veľmi jasno				23 000	0,47
				50 000	0,19

### 2.5.5 Vzdialenosť

Vzdialenosť vplýva na výkon FSO systémov tromi spôsobmi. Za prvé, aj pri čistých poveternostných podmienkach, lúč diverguje a detektor prijíma menej výkonu. Pre kruhový lúč, geometrický útlm trasy vzrastá o 6 dB, keď je vzdialenosť zväčšená o druhú mocninu. Za druhé, celkové prenosové straty vzrastajú so vzrastajúcou vzdialenosťou. Za tretie, efekt scintilácie narastá s väčšími vzdialenosťami. [9]

### 2.5.6 Šírka pásma

V štandardných FSO systémoch limitujú šírku pásma celého systému dva elementy. Tieto elementy sú vysielací zdroj a fotodetektor. Ak sú vo FSO systéme použité LED diódy, šírka pásma je typicky limitovaná na  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ . Ak sú použité laserové zdroje, rýchlosť môže byť omnoho vyššia. [9]

### 2.5.7 Parazitné svetlo

Infračervené vysielace a prijímače sú v typickom vnútornom prostredí vystavené intenzite okolitého svetla, vychádzajúceho ako z prírodných, tak aj z umelých zdrojov. Hlavné zdroje okolitého svetla sú slnko, žiarovky a žiarivky. Slnčné žiarenie je typicky najsilnejším zdrojom šumu a reprezentuje nemodulovaný zdroj parazitného svetla s veľmi širokou spektrálnou šírkou a maximálnou výkonovou spektrálnou hustotou v približne 500 nm. Slnčné žiarenie produkuje najvyššiu úroveň parazitného prúdu a je hlavným zdrojom výstrelového šumu na prijímacej fotodióde. Parazitný prúd generovaný umelými zdrojmi je len niekoľko desiatok  $\mu\text{A}$ , zatiaľ čo prúd generovaný slnečným žiarením môže byť až 5 mA.

Zdroje okolitého svetla majú optické spektrum v oboch operačných vlnových dĺžkach 830 nm a 1550 nm. Fotoprúd generovaný okolitým svetlom vystupuje na prijímači ako zdroj šumu, ktorý degraduje výkon.

### 3 Štatistické modely atmosférických kanálov

Aby bolo možné navrhnúť a implementovať funkčný a efektívny komunikačný systém, je potrebné porozumieť charakteristikám kanálu. Charakterizácia komunikačného kanála je vyjadrená jeho kanálovou impulznou odozvou, ktorá je potom použitá na analýzu a boj s efektmi kanálových skreslení. Bolo publikované značné množstvo prác na charakterizácii kanálu zahrnujúc experimentálne merania a počítačové modelovanie vnútorných aj vonkajších systémov. Výkonové postihy priamo spojené s kanálom môžu byť rozdelené na dva faktory, ktorými sú straty optickej trasy a mnohocestné šírenie. Poznáme dva typy konfigurácie optického bezvláknového spojenia, konfigurácia s priamou viditeľnosťou (LOS) a konfigurácia s nepriamou viditeľnosťou (non-LOS). Pre LOS konfigurácie nemusia byť brané do úvahy odrazy, preto stačí jednoducho vypočítať len straty na optickej trase pomocou známych veličín FOS spojenia (divergencia vysielaného lúča, veľkosť prijímača, vzdialenosť medzi vysielateľom a prijímačom, atď.). Avšak, non-LOS konfigurácia, taktiež známa ako difúzny systém (využívaný hlavne vo vnútorných priestoroch), využíva odrazy od povrchov v miestnosti a nábytku. Tieto odrazy môžu byť brané ako nechcené signály alebo mnohocestné šírenie, dôsledkom ktorých je zložitá predpokladať straty na optickej trase. Existuje množstvo modelov popisujúcich toto šírenie, a niektoré z nich sú popísané v tejto kapitole. Vonkajší atmosférický kanál je veľmi zložitý a dynamické prostredie, ktoré môže pôsobiť na šíriaci sa optický lúč a tým spôsobiť optické straty a turbulenciami indukované fluktuácie amplitúdy a fázy. To taktiež existuje množstvo modelov popisujúcich štatistickú povahu atmosférického kanálu, a aj tieto budú popísané v tejto kapitole. [7]

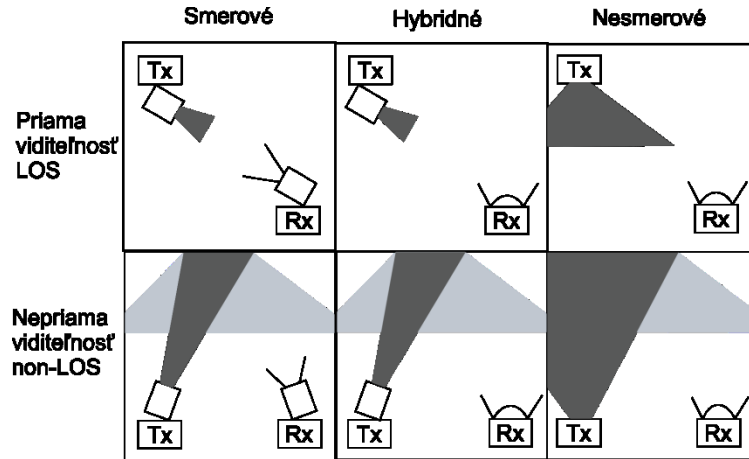
Štatistický model atmosférického kanálu je daný:

$$y = sx + n = \eta I x + n, \quad (3.1)$$

kde  $y$  je signál na prijímači,  $s = \eta I$  je okamžitý zisk intenzity,  $\eta$  je efektívny konverzný pomer svetlo-prúd prijímača,  $I$  je normalizované ožiarenie,  $x$  je modulovaný signál (a nadobúda hodnoty 0 alebo 1), a  $n$  je AWGN s nulovou strednou hodnotou a rozptylom  $N_0/2$ . [12]

#### 3.1 Vnútorné FSO komunikačné kanály

Na obrázku 3.1 sú zobrazené rôzne typy topológií, ktoré sú väčšinou používané pri vnútorných aplikáciách bezvláknovej optiky. Konfigurácie môžu byť rozdelené jednak z hľadiska smerovosti vysielateľa a prijímateľa a jednak podľa existencie priamej viditeľnosti medzi vysielateľom a prijímačom.



Obrázok 3.1: Konfigurácie Vnútrotných FSO systémov

### 3.1.1 LOS model šírenia

Vo všeobecnosti sa vo vnútrotných FSO systémoch využívajú LED diódy ako zdroj optického žiarenia a veľkoplošné fotodetektory. Uholové rozloženie intenzity žiarenia je modelované použitím zovšeobecnenou Lambertovskou intenzitou s nasledujúcim rozdelením:

$$R_0(\varphi) = \begin{cases} \frac{(m_I+1)}{2\pi} \cos^{m_I}(\varphi) & \text{pre } \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right], \\ 0 & \text{pre } \varphi \geq \frac{\pi}{2} \end{cases}, \quad (3.2)$$

kde  $m_I$  je Lambertovo módové číslo vyjadrujúce smerovosť zdrojového lúča,  $\varphi = 0$  je uhol maximálneho vyžiareného výkonu. Rád  $m_I$  je úmerný polouhlu LED pri polovičnom výkone  $\varphi_{1/2}$  ako

$$m_I = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \varphi_{1/2})}. \quad (3.3)$$

Intenzita žiarenia je daná ako

$$S(\varphi) = P_t \frac{(m_I+1)}{2\pi} \cos^{m_I}(\varphi). \quad (3.4)$$

Detektor je modelovaný ako aktívna plocha  $A_r$  zachytávajúca žiarenie dopadajúce uhlami  $\psi$  menšími ako je zorné pole (FOV) detektora. Efektívna zachytávajúca plocha detektora je daná:

$$A_{eff}(\psi) = \begin{cases} A_r \cos \psi & 0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \psi > \frac{\pi}{2} \end{cases}. \quad (3.5)$$

Aj keď by mal byť veľkoplošný detektor ideálny pre vnútorné FSO na zachytávanie toľkého výkonu, ako je možné, v praxi by spôsoboval množstvo problémov. Napríklad zvýšenie výrobných nákladov, zvýšenie prechodovej kapacity a tým zníženie šírky pásma prijímača a zvýšenie šumu prijímača. Preto je použitie nezobrazujúceho koncentrátora cenovo efektívnym



riešením na zvýšenie celkovej efektívnej zachytávajúcej plochy. Optický zisk ideálneho nezobrazujúceho koncentrátora s vnútorným indexom lomu  $n$  je daný:

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_c} & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (3.6)$$

kde  $\psi_c \leq \pi/2$  je FOV.

Dĺžka spojenia pri vnútorných FSO spojeniach je relatívne krátka a preto je útlm spôsobený absorpciou a rozptylom veľmi malý. Uvažujúc FSO spoj s Lambertovským zdrojom, prijímačom s optickým pásmovým filtrom prenosu  $T_s(\psi)$  a nezobrazujúcim koncentrátorom so ziskom  $g(\psi)$ , môže byť zisk jednosmerného prúdu prijímača umiestneného vzhľadom k vysielacu vo vzdialenosti  $d$  a uhlu  $\varphi$  aproximovaný ako:

$$H_{los}(0) = \begin{cases} \frac{A_r(m_l+1)}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \text{všade inde} \end{cases}. \quad (3.7)$$

Prijatý výkon je potom [7]:

$$P_{r-los} = H_{los}(0) P_t. \quad (3.8)$$

### 3.1.2 Non-LOS model šírenia

Pre nesmerové LOS a difúzne spojenia je oveľa ťažšie predpokladať straty na optickej trase, pretože sú závislé na množstve faktoroch, ako rozmery miestnosti, odrazivosť stropu, stien a objektov miestnosti, pozícia a orientácia vysielaca s prijímačom, veľkosť a umiestnenie okien ako aj ďalšie fyzikálne vlastnosti miestnosti. Prijatý výkon je všeobecne definovaný ako:

$$P_{r-nlos} = (H_{los}(0) + H_{nlos}(0)) P_t = (H_{los}(0) + \sum_{refl} H_{refl}(0)) P_t, \quad (3.9)$$

kde  $H_{refl}(0)$  reprezentuje odrazenú trasu.

Odrážová charakteristika povrchov objektov v miestnosti závisí na niekoľkých faktoroch zahrňujúc prenosové vlnové dĺžky, materiál povrchu, uhol dopadu  $\theta_i$  a drsnosť povrchu vzhľadom na vlnovú dĺžku. Hlavne posledný so spomenutých určuje tvar vyžarovacieho diagramu optického odrazu.

## 3.2 Vonkajšie FSO komunikačné kanály

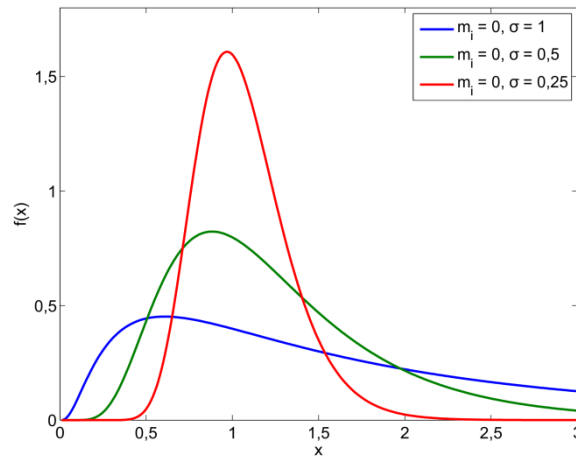
### 3.2.1 Log-normálny model

Log-normálne rozdelenie je široko využívaný model funkciu hustoty pravdepodobnosti ožiarenia z dôvodu jeho jednoduchosti z hľadiska matematických výpočtov. Tento model turbulencie je použiteľný len na podmienky slabšej turbulencie a pre prenosovú vzdialenosť menej než 100 m. S ohľadom na log-normálny model, je funkcia hustoty pravdepodobnosti prijatého optického poľa daná rovnicou 3.10.

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_I^2}} e^{\left[-\frac{(\ln(I)-m_I)^2}{2\sigma_I^2}\right]}, I \geq 0, \quad (3.10)$$

kde  $m_I$  je stredná hodnota a  $\sigma_I$  je štandardná odchýlka  $\ln(I)$ .

Scintilačný index ako funkcia rozptylu je daný  $\sigma_{SI}^2 = e^{\sigma_I^2} - 1$ . Odtiaľ  $\sigma_I^2 = \ln(\sigma_{SI}^2 + 1)$  a preto pre daný scintilačný index môžeme vypočítať  $\sigma_I^2$ . Pre slabé turbulencie, je SI v rozmedzí 0 - 0,75. Ako sa sila turbulencie zvyšuje, do úvahy by mali byť brané efekty viacnásobného rozptylu. [12]



Obrázok 3.2: Log-normálna distribučná funkcia hustoty pravdepodobnosti

### 3.2.2 Gama-Gama model

Andrews et. al. predstavili modifikovanú Rytovu teóriu a navrhli gama-gama funkciu hustoty pravdepodobnosti ako užitočný matematický model pre atmosférickú turbulenciu. Táto modifikovaná Rytova teória definuje optické pole ako funkciu odchýlok, ktoré vznikajú kvôli atmosférickým efektom veľkých a malých mierok. Normalizované ožiarenie je dané ako  $I = I_x I_y$ , kde  $I_x$  a  $I_y$  vyplývajú z turbulentných vírov veľkých a malých mierok a každá z nich sleduje gama rozdelenie. To dáva gama-gama funkciu hustoty pravdepodobnosti ako:

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), I > 0, \quad (3.11)$$

kde  $K_a(\cdot)$  je modifikovaná Besselová funkcia druhého druhu rádu  $a$ .  $\alpha$  a  $\beta$  sú efektívne čísla vírov malých a veľkých mierok rozptylového prostredia. Tieto parametre sú priamo úmerné atmosférickým podmienkam podľa: [12]

$$\alpha = \left[ e^{\left( \frac{0,49\chi^2}{(1+0,18d^2+0,56\chi^{12/5})^{7/6}} \right)} - 1 \right]^{-1} \quad (3.12)$$

$$\beta = \left[ e^{\left( \frac{0,51\chi^2(1+0,69\chi^{12/5})^{-5/6}}{(1+0,9d^2+0,62d^2\chi^{12/5})^{5/6}} \right)} - 1 \right]^{-1} \quad (3.13)$$

### 3.2.3 Negatívne exponenciálny model

V prípade silnej fluktuácie ožiarenia, kde dĺžka spojenia meria niekoľko kilometrov, sa množstvo nezávislých rozptylov stane jedným veľkým. V tomto prípade, amplitúda signálu sleduje Rayleighovo rozdelenie, ktoré zasa vedie k negatívne exponenciálnym štatistikám pre intenzitu signálu (odmocnina z amplitúdy poľa). Toto je dané:

$$p(I) = \frac{1}{I_0} e^{(-\frac{I}{I_0})}, I \geq 0, \quad (3.14)$$

kde  $I_0$  je stredná hodnota žiarenia (priemerný počet fotónov na slot). Tu je  $\sigma_{SI}^2 = 1$  (alebo okoliu 1).[12]

### 3.2.4 K model

Tento štatistický model je používaný pri silnej turbulencii. Tu je SI rovné takmer 1 a hodnota logaritmu rozptylu intenzity je medzi 3 a 4.

Tento model môže byť považovaný za produkt dvoch nezávislých modelov: Exponenciálneho a Gama modelu. Tento model poskytuje výbornú zhodu medzi teoretickými a experimentálnymi hodnotami.[12]

### 3.2.5 I-K model

Tento model môže byť použitý v oboch prípadoch, pri slabej turbulencii a pri silnej turbulencii. Navyše, jeho zložitosť je menšia ako pri gama-gama modelu. Takže je tento model zvyčajne využívaný. [12]

## 4 Parametre FSO spojenia

FSO spojenia môžu byť posudzované z rôznych hľadísk. Veľmi časté je posudzovanie z hľadiska stacionárnych a štatistických parametrov. [10]

### 4.1 Stacionárne parametre

Medzi stacionárne parametre radíme energetickú bilanciu FSO spojenia, prenosové rýchlosti, dosah spojenia a taktiež aj chybovosť spojenia.[10]

#### 4.1.1 Energetická bilancia FSO spojenia

Aby bolo možné vysporiadať sa s atmosférickými efektmi, ktoré negatívne ovplyvňujú kvalitu prenosu, je potrebné poskytnúť dostatočné výkonové rozpätie pre FSO spojenie. Na toto slúži energetická bilancia FSO spojenia. K výpočtu energetickej bilancie spojenia je potrebné poznať všetky hodnoty útlmov, ktoré sa vyskytujú na trase medzi vysielacom a prijímačom.

#### 4.1.2 Prenosové rýchlosti

Jedným z hlavných parametrov každého komunikačného spojenia je prenosová rýchlosť. Pomocou bezvláknových optických spojení je možné dosiahnuť prenosové rýchlosti v rádoch jednotiek  $\text{Gbit.s}^{-1}$ . Útlm v atmosfére a atmosférické vplyvy však spôsobujú, že so vzrastajúcou vzdialenosťou klesá aj prenosová rýchlosť. [10]

#### 4.1.3 Dosah spojenia

Dosah spojenia je vzdialenosť, na ktorú je možné použiť komunikačné spojenie, pričom musia byť dodržané určité minimálne hodnoty na toto spojenie. Sú to napríklad bitová chybovosť a prenosová rýchlosť. Ak sa bavíme o bezvláknových optických spojení, treba rozlišovať či bude toto spojenie pracovať v horizontálnom alebo vertikálnom smere, pretože v každom prípade má atmosféra iné vlastnosti. V súčasnosti sú vzdialenosti pre horizontálne spojenia od stoviek metrov až po jednotky kilometrov. Pre vertikálne spojenia sú to rádovo až desiatky kilometrov. [10]

#### 4.1.4 Bitová chybovosť (BER)

Jedným zo štandardov pre meranie výkonu laserových komunikačných systémov je post-detekčný pomer signálu k šumu (SNR). Zatiaľ čo pre analógové systémy je toto meranie najviac relevantné, pre digitálne systémy dáva väčší zmysel iné meranie. Keď pošleme informáciu digitálnym prenosom, určená správa je konvertovaná na binárne symboly, bity. Prenos digitálnych bitov pomocou optického spojenia je založený na prenose bit-po-bite (binárne kódovanie). Modulovať optické bity je možné ako pri použití impulzného laseru, tak pri použití CW laseru. V oboch prípadoch, nie je reálny výkon meraný priamo pomocou SNR, ale pravdepodobnosťou chyby, taktiež nazývanou bitová chybovosť (BER). BER môže byť definovaná ako pravdepodobnosť, že sa v toku bitov nájde chybný bit, teda "1" bit sa zmení na

"0" bit alebo naopak. Pre komerčné telekomunikačné aplikácie je typickou požadovanou hodnotou  $BER = 10^{-9}$ .

Vo všeobecnosti je BER daná

$$BER = \frac{P_0}{2} + \frac{P_1}{2}, \quad (4.1)$$

kde  $P_0$  je pravdepodobnosť zámeny 0 za 1, a  $P_1$  je pravdepodobnosť zámeny 1 za 0. Dôvod delenia dvomi je, že vo väčšine komunikačných systémoch majú čísla 0 a 1 rovnakú váhu. Ďalším, veľmi často používaným vyjadrením BER je

$$BER = \frac{n_e}{N_B}, \quad (4.2)$$

kde  $n_e$  je počet chybných prijatých bitov a  $N_B$  je počet všetkých prenesených bitov za dostatočne dlhú dobu.

#### 4.1.4.1 BER pre stochastický komunikačný kanál

Ak je komunikačným kanálom turbulentná atmosféra s náhodnými variáciami (priestorovými i časovými) indexu lomu, výkon systému je degradovaný turbulenciou indukovaným rozšírením lúču, fluktuáciami uhla prichádzajúceho signálu a scintiláciou. V prítomnosti týchto dočasných zmien je BER považovaná za podmienenú pravdepodobnosť, ktorá musí byť priemerovaná s funkciou hustoty pravdepodobnosti náhodného signálu, aby mohla byť určená nepodmienená BER. Napríklad v prípade on-off kľúčovania (OOK) a impulznej modulácie v binárne priamom detekčnom prijímači, je BER daná

$$BER = \frac{1}{2} \int_0^\infty p_I(s) \operatorname{erfc} \left( \frac{\langle SNR \rangle s}{2\sqrt{2}\langle i_s \rangle} \right) ds, \quad (4.3)$$

kde  $\langle SNR \rangle$  je stredná hodnota SNR v prítomnosti atmosférických turbulencií,  $\langle i_s \rangle$  je stredná hodnota výstupného prúdu signálu, a  $p_I(s)$  je funkcia hustoty pravdepodobnosti prijatého fluktuujúceho signálu v prijímači, ktorá je závislá na úrovni sily turbulencie a ceste šírenia. Funkcia  $\operatorname{erfc}(s)$ , uvedená v rovnici vyššie, je komplementárna chybová funkcia. Stredná hodnota  $\langle BER \rangle$  pre turbulentný atmosférický kanál je vždy väčšia ako pre neturbulentný kanál.[1]

## 4.2 Štatistické parametre

Medzi štatistické parametre patria informácie majúce súvislosť s lokalitou prevádzky FSO spojenia, je ním teda dostupnosť spojenia.[10]

### 4.2.1 Dostupnosť FSO spojenia

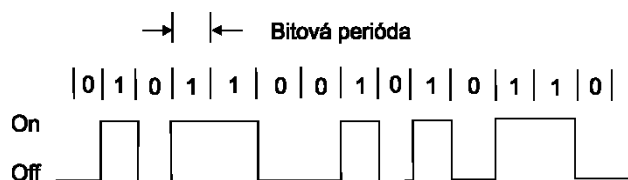
V spojení, perióda nedostupnosti začína s počiatkom desiatich po sebe idúcich veľmi chybných sekúnd (SES). Nová perióda dostupnosti začína na počiatku desiatich po sebe idúcich non-SES. SES je jednosekundová perióda, ktorej BER presiahne určitú hodnotu. Chybná sekunda (ES) je jednosekundová perióda s jednou alebo viacerými chybami. Celkový čas

nedostupnosti  $t_{un}$  je súčet časových intervalov, kedy je spojenie nedostupné, za určitú pozorovanú dobu  $t$ . Potom môže percento nedostupnosti spojenia dané ako: [24]

$$P_{un} = \frac{t_{un}}{t_{total}} * 100. \quad (4.4)$$

Linkové kódy sú tiež známe ako kódy v základnom pásme, prenosové módy, formáty/vlnové formáty základného pásma. Tieto kódy boli vyvinuté pre digitálny prenos cez telefónne káble alebo digitálne nahrávanie na magnetické média odnedávna aj pre prenosové systémy pomocou optických vlákien a pre FSO systémy. [14] V optických komunikáciách sa používajú linkové kódy NRZ, RZ a Diferenciálny Manchester. [10]

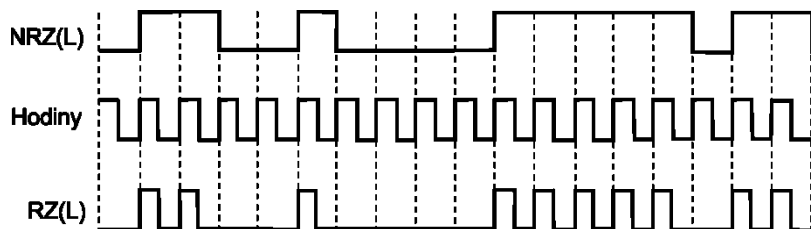
NRZ kódovanie vyžaduje minimálne požiadavky na šírku pásma, ale priemerný vstupný výkon prijímača je závislý na vzorke dát. Napríklad, vysoká úroveň prijatého výkonu vyskytujúca sa pri dlhom reťazci „1“ bitov nasledujúcich za sebou môže vyústiť k zmene základnej úrovne. Tento efekt je výsledkom nahromadenia „chvostov“ impulzov, ktoré vyplývajú z nízkofrekvenčnej charakteristiky AC – väzobného filtra v prijímači. Ak je návrat prijímača na originálny rozhodovací prah po ukončení dlhého reťazca „1“ bitov pomalý, môže nastať chyba, ak ďalší „1“ bit má nízku amplitúdu. [13] Príklad tohto kódovania je zobrazený na obrázku 5.1.



- 35 -

## 5.2 Return-to-Zero

V tomto linkovom kóde je bit „1“ vyjadrený ako impulz o amplitúde  $A$  a jeho trvanie je kratšie ako je perióda bitu. Bit „0“ je vyjadrený absenciou impulzu. Výraz návrat k nule (return-to-zero) teda znamená, že impulz ide k nule ešte pred koncom periódy bitu. [15] Príklad takéhoto kódovania je na obrázku 5.2.



Obrázok 5.2: Rozdiel medzi NRZ a RZ kódovaním

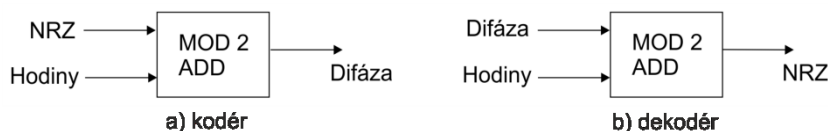
Hlavná výhoda RZ oproti NRZ spočíva vo zvýšení prechodov výsledkom čoho je zlepšenie v obnove časovania. Nevýhodou RZ kódovania je to, že dlhé reťazce „0“ bitov môžu spôsobiť stratu časovej synchronizácie. [13][16]

## 5.3 Manchester

Manchester (taktiež známe bifázové, difázové kódovanie) je metóda dvojúrovňového kódovania kde

$$f_1(t) = \begin{cases} V & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ -V & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}, f_2(t) = -f_1(t). \quad (5.1)$$

Tento kód môže byť generovaný z NRZ pomocou logických operácií EXCLUSIVE OR alebo MOD 2 ADD tak, ako je zobrazené na obrázku 5.3. Dekódovanie je uskutočnené rovnakou logickou operáciou akú vykonal kodér. [16]

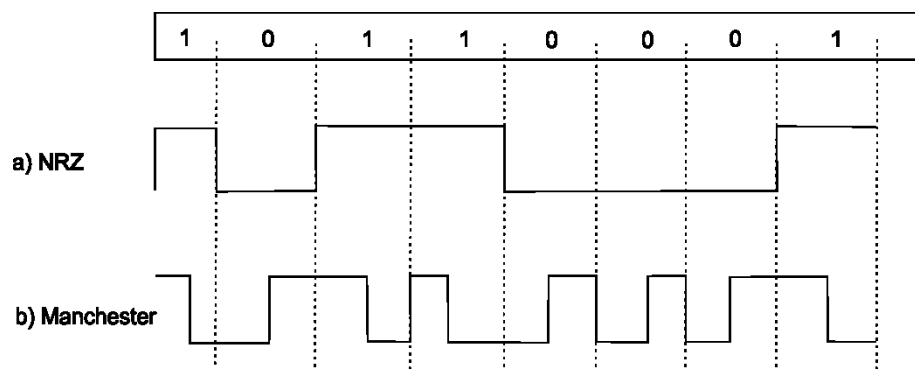


Obrázok 5.3: Blokový diagram kódera a dekodera Manchester kódovania

Hlavnou výhodou Manchester kódovania je jeho relatívne malá pravdepodobnosť chyby v porovnaní s ostatnými kódmi. Poskytuje dobrú informáciu o časovaní, pretože v strede každého bitu nastane prechod, pričom tento prechod je dekódovaný ako 0 ak je tento prechod kladný a ako 1 ak je záporný. Manchester kódovanie má konštantnú jednosmernú zložku jeho priebeh sa nezmení pri prechode kondenzátorom alebo transformátorom. Avšak, pred prenášanou informáciou by mala byť vložená „tréninová“ kódová sekvencia ako preambula. To umožní kondenzátorom v detekčnom obvode v prijímači dosiahnuť rovnováhu nabitia ešte



pred tým ako sa objaví užitočný bit. [17] Na obrázku 5.4 je zobrazený Manchester kódovanie v porovnaní s NRZ.



Obrázok 5.4: Manchester kódovanie

## 6 Modulačné techniky používané vo vonkajších FSO spojeniach

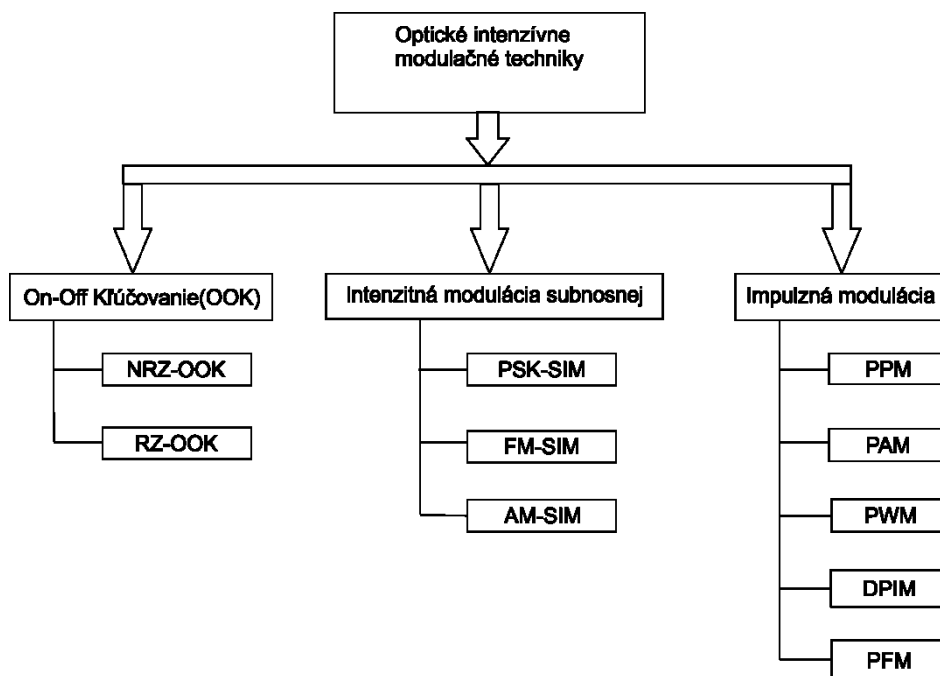
V súčasnosti je hlavným cieľom modulácie vtlačiť čo najviac dát do čo najmensej časti spektra ako je možné. Tento cieľ, známy ako spektrálna účinnosť, meria ako rýchlo môžu byť dáta prenesené v pridelenom pásme. Bolo objavených viacero techník ako dosiahnuť a zlepšiť spektrálnu účinnosť.

Vo FSO komunikačných systémoch, intenzita optického zdroja je modulovaná na prenosový signál. Pre digitálny prenos dát, digitálna modulácia poskytuje zdrojové kódovanie (kompresiu dát), kanálové kódovanie (detekcia/korekcia chýb), a ľahké multiplexovanie viacerých informačných prúdov. Na prenos digitálnych dát môže byť použité či už kódovanie bit-po-bite (binárne kódovanie) alebo kódovanie bit-slovo (blokové kódovanie). Optická nosná môže mať modulovanú amplitúdu, frekvenciu, fázu, alebo polarizáciu. Modulácia vo FSO je odlišná od modulácie pri rádiových frekvenciách. Súčasne je najvhodnejšia modulácia intenzity (IM), kde je požadovaný priebeh modulovaný na okamžitý výkon nosnej. Na strane prijímača, najpraktickejšia metóda je priama detekcia (DD), kde fotonový detektor produkuje prúd úmerný prijatému okamžitému výkonu. Spoločnosť na IM/DD bude mať značný vplyv na dizajn celého optického systému. Treba si pamätať, že prenášaný signál nikdy nemôže byť negatívny. Intenzita preneseného signálu, ktorý nesie informáciu nemôže byť nikdy negatívna. Preto, modulačný koeficient musí byť nastavený tak aby signál vyhovoval non-negatívnej požiadavke. Toto je odlišné od RF modulačnej schémy, kde koeficienty, napríklad pre kvadrátornú amplitúdovú moduláciu (QAM) sú komplexné a reprezentujú amplitúdu a fázu signálu.

Existuje mnoho rôznych typov modulačných schém, ktoré sú vhodné pre FSO komunikačné systémy ako napríklad On-Off Kľúčovanie (OOK), Impulzne Polohová Modulácia (L-PPM), Impulzne Amplitúdová Modulácia (M-PAM), Diferenčné Kľúčovanie Fázovým Posunom (DPSK), Binárne Kľúčovanie Fázovým Posunom (BPSK) a Kvadrátorne Kľúčovanie Fázovým Posunom (QPSK), Kvadrátorna Amplitúdová Modulácia (L-QAM). Keďže je priemerný emitovaný optický výkon vždy limitovaný, výkon modulačných techník je často porovnávaný ako priemerný prijatý optický výkon potrebný na dosiahnutie určitej BER pri danej prenosovej rýchlosti. Je veľmi žiaduce pre modulačnú schému aby bola výkonnostne účinná, avšak nie je to jediný rozhodujúci faktor pri výbere modulačnej techniky. Každá modulačná schéma má svoje vlastné atraktívne vlastnosti pre každú špecifickú variantu optického spojenia pri rôznych prírodných podmienkach. Pre správny výber dizajnu FSO komunikačného systému je potrebné zvážiť všetky pre a proti každej modulačnej techniky. Základné parametre, ktoré sú porovnávané pri modulačných schémach sú [4][5]:

- Výkonová účinnosť - možno najdôležitejší činiteľ, keďže optický výkon pre prenos je limitovaný z dôvodu bezpečnosti očí kože a takisto aj z hľadiska ceny.

- Pásmová účinnosť - v konečnom dôsledku je FSO komunikačný systém limitovaný aj z hľadiska šírky pásma subsystémov ako: fotodetektor a viaccestné šírenie. Pásmová účinnosť je preto dôležitý činiteľ pri výbere typu modulácie.
- Jednoduchosť a cena - pri výbere typu modulácie je nutné zohľadniť aj samotný FSO komunikačný systém. V niektorých situáciách musia byť zohľadnené aj činitele ako kanálom-indukovaná disperzia a rozličné vonkajšie zdroje šumu, pri ktorých musí FSO pracovať.



Obrázok 6.1: Strom intenzitných modulačných techník [6]

## 6.1 On-Off Kľúčovanie (OOK)

Modulačný formát OOK je dominantnou modulačnou schémou využívanou vo FSO komunikačnom systéme. Dôvodom je jej jednoduchosť a pružnosť pri nelinearitách laseru. OOK môže využívať impulzný formát bez-návratu-k-nule (NRZ) alebo impulzný formát s-návratom-k-nule (RZ). V NRZ-OOK, optický impulz špičkového výkonu  $\alpha_e P_T$  ( $\alpha_e$  je podiel extinkcie optického zdroja,  $0 \leq \alpha_e \leq 1$ ) reprezentuje digitálny symbol "0", kým prenos optického impulzu špičkového výkonu  $P_T$  reprezentuje digitálny symbol "1". Konečná doba trvania optického impulzu je rovnaká ako perióda symbolu  $T$ . Pri OOK-RZ je doba trvania impulzu menšia ako doba trvania bitu. Táto skutočnosť je zlepšením vo výkonnej efektívitve oproti NRZ-OOK, ale na úkor zvýšenia potrebnej šírky pásma.[4][6]

### 6.1.1 Základy OOK vo FSO komunikáciách

Hardvér vysielača a prijímača pre OOK je relatívne jednoduchý. Známa tiež ako binárne kľúčovanie zmenou amplitúdy (ASK), je OOK formou IM, v ktorej je binárna informácia reprezentovaná prítomnosťou alebo absenciou optickej energie signálu v rámci

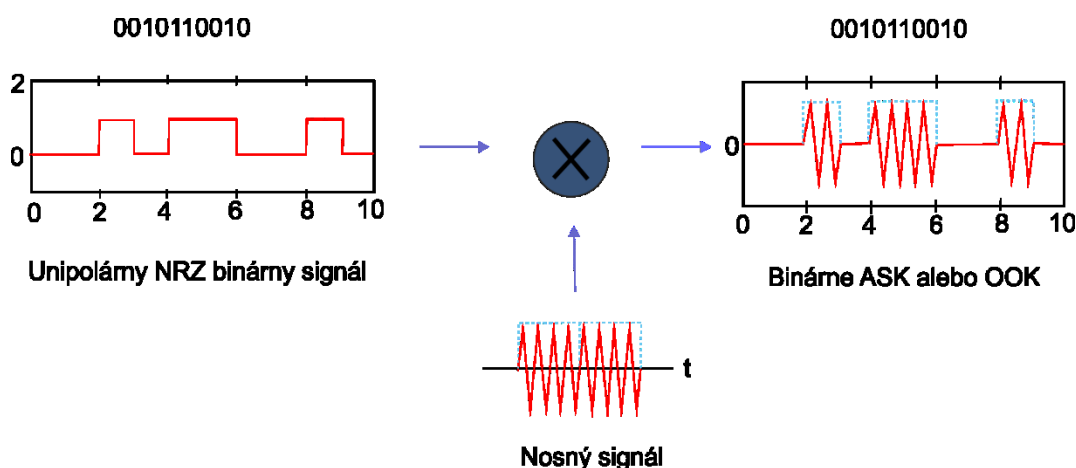
symbolu. Rozhodnutie o tom či je prijatý symbol "0" alebo "1" sa v prijímači určí pomocou prijatej energie symbolu, ktorá je nad alebo pod prahovou hodnotou (táto prahová hodnota je dopredu nastavená). Prenosová rýchlosť je daná

$$R_b = 1/T_b, \quad (6.1)$$

kde  $T_b$  je trvanie bitu a je priamo úmerné k rýchlosti, ktorou prenosový optický zdroj prepína medzi on a off. Normalizovaný prenosový tvar impulzu pre OOK je daný

$$P(t) = \begin{cases} 1, & \text{pre } t \in [0, T_b] \\ 0, & \text{všade inde} \end{cases}, \quad (6.2)$$

Ako je spomenuté vyššie, OOK je tiež známa ako binárne ASK. V ASK, je amplitúda nosnej menená v závislosti na informácii a všetko ostatné ostáva rovnaké. Bit "1" je prenesený nosnou s jednou určitou amplitúdou. Na prenos "0" sa zmení amplitúda, pričom frekvencia ostane zachovaná. OOK je teda špeciálnou formou ASK, v ktorej je jedna z amplitúd nulová tak ako je ukázané nižšie na obrázku 6.2.

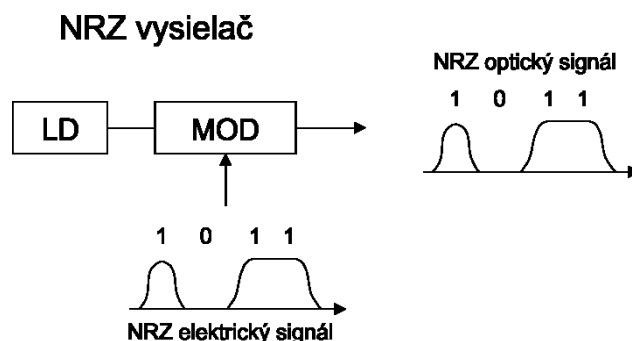


Obrázok 6.2: Modulovanie signálu OOK technikou

### 6.1.2 NRZ-OOK

Modulácia OOK, spoločne s linkovým kódom NRZ, bola dlhodobo dominantným modulačným formátom v IM/DD optickým komunikačných systémoch. Niekedy je pre jednoduchosť označovaný len ako NRZ. Existuje niekoľko dôvodov, prečo bol tento formát tak veľmi využívaný. Za prvé, vyžaduje relatívne malú elektrickú šírku pásma pre vysieláče a prijímače (v porovnaní s RZ), za druhé, nie je citlivý na fázový šum laseru (v porovnaní s PSK), a nakoniec, má najjednoduchšiu konfiguráciu vysieláča a prijímača. V posledných rokoch, optické komunikácie postupujú k vyšším prenosovým rýchlostiam, DWDM a dlhým vzdialenostiam s optickými zosilňovačmi, preto by NRZ modulačný formát nemusel byť práve tou najlepšou voľbou. Avšak, z dôvodu jednoduchosti a historickej dominancie, by NRZ mohol byť dobrou referenciou pre účel porovnania.

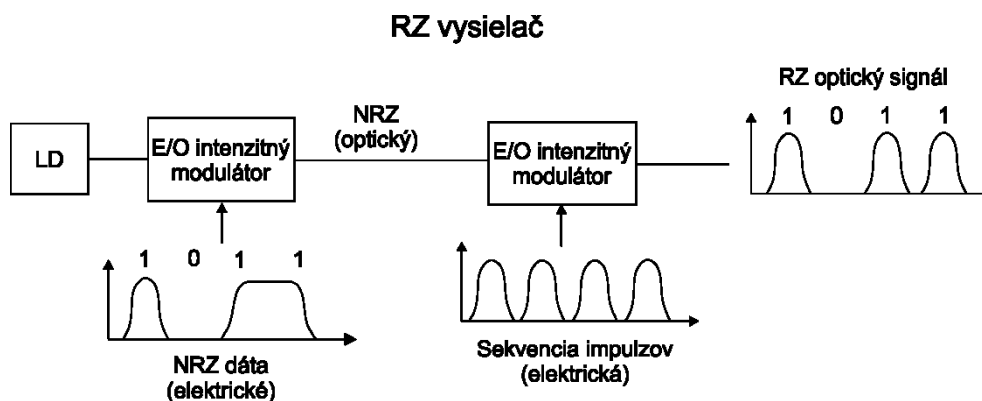
Blokový diagram NRZ vysielača je zobrazený na obrázku 6.3, kde je elektrický signál modulovaný externým intenzitným modulátorom. Intenzitný modulátor môže byť typu Mach-Zehnder alebo s využitím elektro-absorpcie, ktorý konvertuje OOK elektrický signál s prenosovou rýchlosťou  $R_b$  na OOK optický signál s rovnakou prenosovou rýchlosťou. Šírka optického impulzu každej izolovanej digitálnej "1" je nepriamo úmerná prenosovej rýchlosti. Na detekciu NRZ optického signálu je v prijímači použitá jednoduchá fotodióda, ktorá konvertuje optický výkon signálu na elektrický prúd. Využíva teda priamu detekciu DD. [8]



Obrázok 6.3: Blokový diagram NRZ vysielača

### 6.1.3 RZ-OOK

RZ znamená "návrat k nule", takže šírka impulzu optického signálu je potom menšia ako šírka periódy bitu. Na generovanie RZ tvaru optického signálu je väčšinou používaný hodinový signál, ktorý má rovnakú prenosovú rýchlosť ako elektrický signál. Obrázok 6.4 zobrazuje blokový diagram typického RZ vysielača.



Obrázok 6.4: Blokový diagram RZ vysielača

Na začiatku je generovaný NRZ optický signál pomocou externého modulátoru intenzity, tak ako je spomenuté v kapitole 6.1.2. Potom je signál modulovaný synchronizovaným impulzným radom s rovnakou prenosovou rýchlosťou ako elektrický signál s použitím ďalšieho modulátora intenzity. Bolo zistené, že RZ optický signál je viac odolný voči nelinearitám ako NRZ optický signál. Dôvodom tejto odolnosti je pravdepodobne jeho pravidelnosť dátovej štruktúry optického signálu. Podľa charakteristiky "návratu k nule" RZ

optického signálu, izolovaný digitálny bit "1" a viacero za sebou idúcich digitálnych bitov "1", budú potrebovať rovnaké množstvo optimálnej kompenzácie disperzie pre najlepšie otvorenie oka. Z toho vyplýva, že s optimálnou kompenzáciou disperzie v systéme, RZ formát vykazuje lepšiu toleranciu na nelinearity ako NRZ. [8]

#### 6.1.4 OOK v Poissonovom atmosférickom optickom kanáli

Ak je priemerný výkon prijímača daný

$$P_R = P_T * e^{-\gamma_T L}, \quad (6.3)$$

kde  $\gamma_T$  reprezentuje celkový útlm kanálu, potom priemerný počet prijatých fotoelektrónov je daný

$$\langle n \rangle = \frac{\eta \lambda T P_R}{hc}, \quad (6.4)$$

kde  $h$  je Plancková konštanta a  $c$  je rýchlosť svetla vo vákuu,  $\eta$  je kvantová účinnosť fotodetektora a  $T$  je doba trvania optického impulzu. Avšak, okamžité množstvo<sup>1</sup>  $n$ , na rozdiel od priemerného množstva, nie je konštanta. Mení sa s časom a to z nasledujúcich dôvodov:

- Kvantový charakter svetla / fotodetekčného procesu, ktorý predpokladá, že okamžitý počet množstiev  $n$  má diskkrétne Poissonovo rozdelenie s pridruženým kvantovým šumom odchýlky  $\langle n \rangle$ . To znamená, že stredná hodnota a odchýlka Poissonovho rozdelenia sú rovnaké.
- Prijaté pole signálu sa náhodne mení vplyvom efektu scintilácie.

Z toho vyplýva, že počet množstiev je teraz dvojnásobne stochastický a je založený na log-normálnom modeli turbulencie. Pravdepodobnosť  $n$  množstiev je odvodená ako:

$$p_1(n) = \int_0^\infty \frac{\left(\frac{\eta \lambda T P_R}{hc}\right)^n e^{-\frac{\eta \lambda T P_R}{hc}}}{n! \sqrt{2\pi \sigma_I^2 P_R}} e^{-\frac{1}{2\sigma_I^2} \left(\ln \frac{P_R}{P_0} + \frac{\sigma_I^2}{2}\right)^2} dP_R, \quad (6.5)$$

kde  $P_0$  je prijatý priemerný výkon pri absencii atmosférickej turbulencie a  $\sigma_I^2$  je indikátor sily výkonovej fluktuácie. Keď je prenesený optický impulz (to zn. keď je poslaný bit "1"), chybné rozhodnutie sa objaví vtedy, ak počet množstiev  $n$  je menší než dopredu určená prahová hodnota množstva  $n_{th}$ . Potom, pravdepodobnosť detekcie bitu "0", keď je prenesený bit "1", je daná:

$$p_1(n < n_{th}) = \sum_{n=0}^{n_{th}-1} \left[ \int_0^\infty \frac{\left(\frac{\eta \lambda T (P_R + P_{Bg})}{hc}\right)^n e^{-\frac{\eta \lambda T (P_R + P_{Bg})}{hc}}}{(hc)^n n! \sqrt{2\pi \sigma_I^2 P_R}} e^{-\frac{1}{2\sigma_I^2} \left(\ln \frac{P_R}{P_0} + \frac{\sigma_I^2}{2}\right)^2} dP_R \right], \quad (6.6)$$

kde  $P_{Bg}$  je výkon okolitého svetla, ktoré dopadá na prijímač a  $n_b$  je teda:

<sup>1</sup> Z anglického "count"

$$n_b = \frac{\eta \lambda T P_{Bg}}{hc}. \quad (6.7)$$

Podobne je vyjadrená aj pravdepodobnosť detekcie bitu "1" keď je prenesený bit "0". Je to teda:

$$p_0(n > n_{th}) = \sum_{n=n_{th}}^{\infty} \frac{\left(\frac{\eta \lambda T P_{Bg}}{hc}\right)^n e^{-\frac{\eta \lambda T P_{Bg}}{hc}}}{n!} = 1 - \sum_{n=0}^{n_{th}-1} \frac{\left(\frac{\eta \lambda T P_{Bg}}{hc}\right)^n e^{-\frac{\eta \lambda T P_{Bg}}{hc}}}{n!}. \quad (6.8)$$

Z rovnice (3.8) by malo byť zrejmé, že atmosférická turbulencia nemá žiadny vplyv ak nie je prenášaná žiadny optický výkon. Ak majú bity "1" a "0" rovnakú pravdepodobnosť, že budú prenesené, tak potom teoretická bitová chybovosť systému  $P_e$  je daná:

$$P_e = 0,5[p_0(n > n_{th}) + p_1(n < n_{th})] \quad (6.9)$$

Pre optimálny výkon, je  $n_{th}$  takou hodnotou  $n$ , ktorá vyhovuje rovnici (6.10) získanej vyvolaním maximálnej pravdepodobnosti symbol-za-symbolom detekčnej podmienky. [6][7]

$$(P_{Bg})^n e^{-\frac{\eta \lambda T P_{Bg}}{hc}} = \int_0^{\infty} \frac{(P_R + P_{Bg})^n e^{-\frac{\eta \lambda T (P_R + P_{Bg})}{hc}}}{\sqrt{2\pi\sigma_I^2 P_R}} e^{-\frac{1}{2\sigma_I^2} \left(\ln \frac{P_R}{P_0} + \frac{\sigma_I^2}{2}\right)^2} dP_r \quad (6.10)$$

### 6.1.5 OOK Gaussovom atmosférickom optickom kanáli

Pri signáli s veľkým množstvom fotoelektrónov a vziať do úvahy detekčného termálneho šumu, môže byť pravdepodobnostné rozdelenie generovaného signálového prúdu aproximované Gaussovým rozdelením. Bez straty na všeobecnosti, plocha prijímača môže byť normalizovaná k jednotke tak, aby optický signál mohol byť vyjadrený optickou intenzitou  $I$ . Ak  $R$  reprezentuje spoľahlivosť PIN fotodetektora, prijatý signál v systéme s OOK je potom daný ako:

$$i(t) = RI[1 + \sum_{j=-\infty}^{\infty} d_j g(t - jT)] + n(t), \quad (6.11)$$

kde  $n(t) \sim N(0, \sigma^2)$  je aditívny biely Gaussov šum,  $g(t - jT)$  je tvarovacia funkcia impulzu a  $d_j = [-1, 0]$ . V prijímači, je prijatý signál poslaný do rozhodovacieho detektora, ktorý porovnáva prijatý signál s dopredu určenou prahovou úrovňou. Predpoklad aby bol prijatý digitálny symbol "1" je, že prijatý signál musí byť nad prahovou úrovňou. Naopak, pre digitálny symbol "0" musí byť prijatý signál pod prahovou úrovňou. Pravdepodobnosť chyby je potom daná ako:

$$P_e = p(0) \int_{i_{th}}^{\infty} p(i/0) di + p(1) \int_0^{i_{th}} p(i/1) di, \quad (6.12)$$

kde  $i_{th}$  je prahová úroveň signálu a marginálne pravdepodobnosti sú definované ako:

$$p(i/0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{(-i^2/2\sigma^2)} \quad (6.13)$$

$$p(i/1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left[\frac{-(i-RI)^2}{2\sigma^2}\right]}. \quad (6.14)$$

Pre rovnakú pravdepodobnosť symbolov,  $p(0) = p(1) = 0,5$ , je optimálny prahový bod v  $i_{th} = 0,5RI$  a podmienená pravdepodobnosť chyby je redukovaná na:

$$P_{ec} = Q\left(\frac{i_{th}}{\sigma}\right), \quad (6.15)$$

kde  $Q(x) = 0,5\text{erfc}(x/\sqrt{2})$ . Za prítomnosti atmosférickej turbulencie, prahová úroveň už nie je fixovaná uprostred medzi úrovňami signálu reprezentujúcimi symboly "1" a "0". Marginálna pravdepodobnosť  $p(i/1)$  je potom modifikovaná priemerovaním podmienenej funkcie hustoty pravdepodobnosti signálu  $i(t)$  cez štatistiky scintilácie. Treba si však pamätať, že scintilácia sa neprejavuje ak nie je prenášaný žiadny impulz.

$$p(i/1) = \int_0^\infty p(i/1, I)p(I)dI \quad (6.16)$$

Predpokladaním prenosu s rovnakou pravdepodobnosťou symbolov a využitím skúseností so symbol-za-symbolom detekciou, pravdepodobnostná funkcia  $\Lambda$  je daná: [6][7]

$$\Lambda = \int_0^\infty e^{\left[\frac{-(i-RI)^2 - i^2}{2\sigma^2}\right]} p(I)dI. \quad (6.17)$$

## 6.2 Kľúčovanie Fázovým Posunom (PSK)

Kľúčovanie fázovým posuvom tvorí veľkú skupinu digitálnych modulačných schém.[22] V PSK sú informačné bity zakódované pomocou zmeny fázy nosného signálu a amplitúda signálu zostáva nezmenená.[25] V nasledujúcich podkapitolách sú popísané niektoré varianty PSK.

### 6.2.1 Binárne kľúčovanie fázovým posunom (BPSK)

BPSK je digitálna modulačná schéma, ktorá prenáša dáta zmenou alebo modulovaním referenčného signálu (nosnej vlny). BPSK je vhodná pre nízko nákladové pasívne vysielace a taktiež je najjednoduchšou formou PSK. Používa dve fázy, ktoré sú oddelené  $180^\circ$  a niekedy je tiež nazývaná aj 2-PSK. Nezáleží kde prese sa budú konštelačné body nachádzať, ale väčšinou sú prezentované na reálnej ose na  $0^\circ$  a  $180^\circ$ . Táto modulácia je najrobustnejšia zo všetkých PSK modulácií, pretože nesie najvyššiu úroveň šumu. Bitová chybovosť môže byť vyjadrená pomocou rovnice (6.18). [23]

$$BER = \frac{1}{2}\text{erfc}(\sqrt{SNR}). \quad (6.18)$$

### 6.2.2 M-stavové kľúčovanie fázovým posunom (MPSK)

Motiváciou MPSK je zvýšenie účinnosti šírky pásma PSK modulácií. V BPSK je dátový bit reprezentovaný symbolom. V MPSK je  $n = \log_2 M$  dátových bitov reprezentovaných symbolom, pásmová účinnosť je teda zvýšená  $n$ -krát.

Cieľom moderných technológií je využívať kompletne digitálne prístroje. V takomto prostredí sú MPSK signály digitálne syntetizované a poslané do DA prevodníku, výstupom ktorého je požadovaný fázovo modulovaný signál.

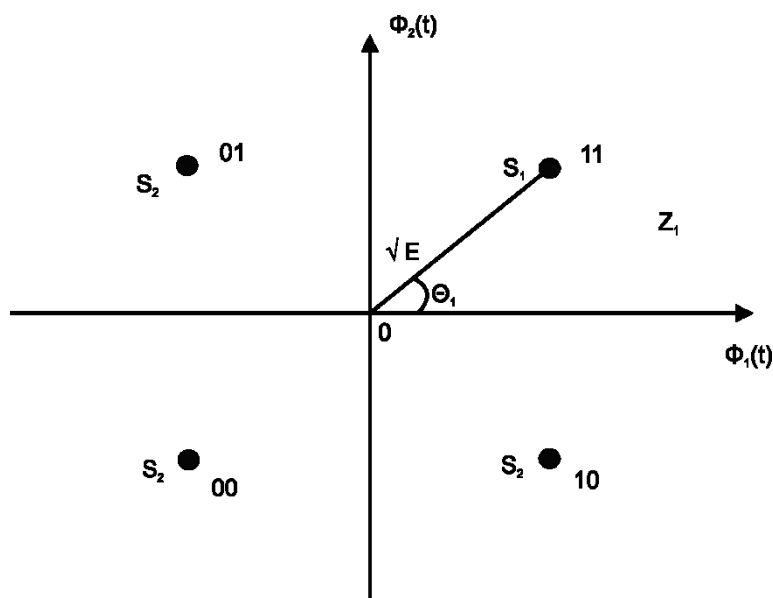


MPSK vyššieho rádu môžu byť použité ak je požadovaný vyššia pásmová účinnosť alebo je k dispozícii väčší odstup signálu od šumu. [22]

### 6.2.3 Kvadrátúrne kľúčovanie fázovým posunom (QPSK)

Spomedzi všetkých MPSK schém je QPSK najčastejšie používanou schémou, pretože netrpí degradáciou BER, zatiaľ čo je jej pásmová účinnosť zvýšená. Ostatné MPSK schémy síce zvyšujú pásmovú účinnosť, ale za cenu degradácie BER.

Konštelačný diagram je zobrazený na obrázku 6.5. V QPSK systéme sú dátové bity rozdelené do dvojbitových skupín, ktoré sú nazývané dibity. Pri tejto modulácii sú možné štyri dibity: 00, 01, 10 a 11. [22]



Obrázok 6.5: Konštelačný diagram QPSK modulácie

Každý dibit tvorí jeden symbol. Vďaka sledovaniu fáze prijatého signálu, môže prijímač určiť, aký symbol bol prenesený. Avšak, je potrebné aby frekvencia a fáza nosnej boli zhodné s frekvenciou a fázou prijatého signálu. Túto synchronizáciu je zložitá zabezpečiť na optických frekvenciách. Jedným riešením je použitie DQPSK, ktorá je popísaná v kapitole 6.2.4. [25]

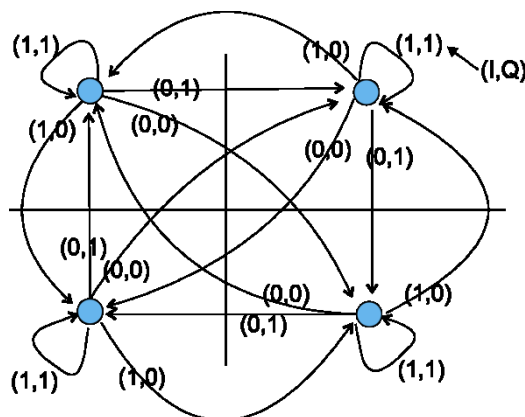
QPSK môže byť použitá na zdvojnásobenie prenosovej rýchlosti oproti BPSK, pričom požiadavky na šírku pásma budú rovnaké. Z toho vyplýva, že QPSK môže pracovať aj v móde, keď poskytne rovnakú prenosovú ako BPSK, ale požiadavky na šírku pásma budú polovičné. Bitová chybovosť môže byť vyjadrená pomocou rovnice (6.19). [23]

$$BER = \operatorname{erfc}(\sqrt{SNR}). \quad (6.19)$$

### 6.2.4 Diferenciálna QPSK

V DQPSK sú informačné symboly reprezentované fázovými rozdielmi, diferenciami, medzi jednotlivými symbolmi namiesto kódovania absolútnou fázou. V tomto prípade nemusí

prijímač detegovať absolútnu hodnotu fázy, ale len zmenu fázy, a preto nie je nutná synchronizácia s nosnou. Na obrázku 6.6 je zobrazené mapovanie vstupných bitov na zmeny fázy nosnej.[25]



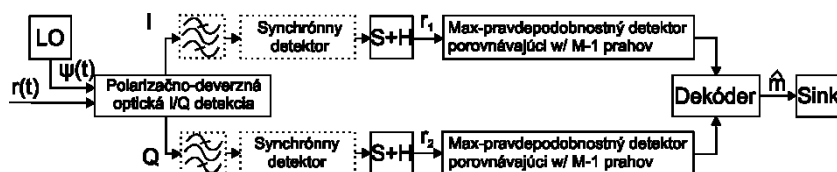
Obrázok 6.6: Mapovanie vstupných bitov na zmeny fázy nosnej

### 6.3 Kvadrátúrna Amplitúdová Modulácia (QAM)

QAM je kombinácia fázovej a amplitúdovej modulácie. Tento termín je často aplikovaný na pravouhlé symbolové konštelácie v komplexnej symbolovej rovine. Avšak, existujú aj iné konštelácie založené na viacnásobnej PSK.

Aj keď môže byť QAM s diferenčným predkódovaním detegovaná nekoherentne s I a Q oneskorenými demodulátormi a vetvami s viacúrovňovou priamou detekciou, pozornosť patrí koherentnej detekcii.

Typická štruktúra koherentného M-QAM prijímača je zobrazená na obrázku 6.7. Skladá sa z dvoch vetví (I a Q). Obe vetvy používajú  $ML^2$  viacúrovňové detektory.



Obrázok 6.7: Koherentná detekcia M-QAM

M-QAM môže byť zobrazená ako kombinácia dvoch modulácií v I a Q vetvách. Ak nie je v ani jednej vetve detegovaná chyba, neobjaví sa žiadna bitová chyba. Z dôvodu ortogonalít I a Q, môže byť symbolová chybovosť vyjadrená ako:

$$P_s(M) = 1 - P_c(M), \quad (6.20)$$

kde  $P_c(M)$  je pravdepodobnosť, že v ani jednej vetve nenastane chyba.

<sup>2</sup> Maximum-likelihood – Maximálna pravdepodobnosť

Čo sa týka symetrie v signálovej rovine,  $P_c$  môže byť vyjadrená ako:

$$P_c = P_r(I) * P_r(Q) = P_r(I)^2 = (1 - P_s(\sqrt{M}))^2, \quad (6.21)$$

kde  $P_r$  je pravdepodobnosť, že nenastane chyba.  $P_s(\sqrt{M})$  je symbolová chybovosť bipolárneho  $\sqrt{M}$  – ASK. Symbolová chybovosť pre QAM s homodynou detekciou je potom daná ako:

$$P_s(M) = 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 M E_b}{M-1 N_0}} \right). \quad (6.22)$$

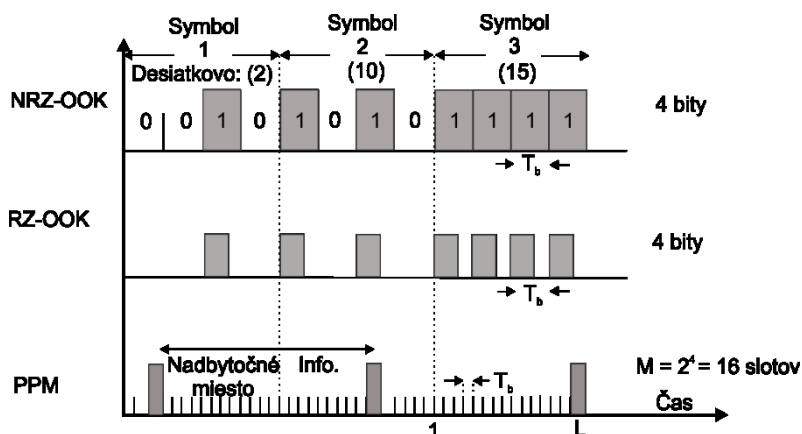
Vo všeobecnosti M-QAM dosahuje lepšie výsledky ako M-PSK pre  $M > 4$ . Pri  $M = 4$  sú obe modulácie identické. [21]

## 6.4 Impulzná Polohová Modulácia (PPM)

PPM je ortogonálna modulačná technika a člen rodiny impulzných modulácií (pozri obrázok 6.1). PPM modulačná technika je zlepšením vo výkonovej účinnosti oproti OOK, avšak, za cenu zvýšenia nárokov na šírku pásma a väčšej zložitosti. V PPM, každý blok  $\log_2 M$  dátových bitov je mapovaný na jeden z  $M$  možných symbolov. Všeobecne, notácia  $M$ -PPM určuje rád PPM. Každý symbol pozostáva z impulzu o konštantnom výkone  $P_T$ , ktorý obsadzuje jeden slot, a  $M - 1$  prázdnych slotov. Pozícia impulzu korešponduje s decimálnou hodnotou  $\log_2 M$  dátových bitov. Preto je informácia zakódovaná pozíciou impulzu v rámci symbolu. Doba trvania slotu  $T_s$  je vzťahovaná k perióde bitu podľa nasledujúceho vzťahu:

$$T_s = \frac{T \log_2 M}{M}. \quad (6.23)$$

Časový priebeh pre 16-PPM v porovnaní s OOK je zobrazený na obrázku 6.8.



Obrázok 6.8: Časový priebeh pre 4-bitové OOK a 16-PPM

V prípade, že bude informácia zakódovaná pomocou impulznej modulácie, PPM prijímač bude potrebovať slotovú aj symbolovú synchronizáciu aby mohol takýto signál demodulovať. Napriek tomu, vďaka svojej výkonovej účinnosti, je PPM atraktívnou modulačnou technikou pre bezvláknové komunikačné systémy, a to hlavne v komunikačných

aplikáciách v hlbokom vesmíre. Za predpokladu, že je kompletná synchronizácia medzi vysielateľom a prijímačom vždy zaistená, optický prijímač deteguje prenesený signál pokusmi určiť energiu v každom možnom časovom slotu. Následne zvolí signál, ktorý zodpovedá maximálnej energii. V priamej fotodetekcii je to ekvivalentné "počítaniu" uvoľnených elektrónov v každom  $T_s$  intervalu. Foto počet za PPM slot môže byť potom získaný z:

$$K_s = \frac{\eta \lambda P_R T_s}{hc}, \quad (6.24)$$

kde  $P_R$  je prijatý optický výkon po čas doby trvania slotu. Pre zvýšenie počtu fotónov za PPM slot môže byť použitá APD. Nanešťastie, foto-násobiaci proces, ktorý riadi generovanie sekundárnych elektrónov je procesom náhodným. Z toho vyplýva, že veľký foto-násobiaci zisk eventuálne povedie k vysokému faktoru šumu a k náchylnosti na chyby. Pre stredne vysoký prijatý signál, čo je prípad komerčných a FSO systémom na krátku vzdialenosť, BER závislé na  $K_s$  je dané:

$$P_{ec} = Q \left( \sqrt{\frac{(\bar{g}q)^2 K_s^2}{(\bar{g}q)^2 F(K_s + 2K_{Bg}) + 2\sigma_{Th}^2}} \right), \quad (6.25)$$

kde parametre sú definované v tabuľke 6.1.

Tabuľka 6.1: Parametre v rovnici 6.25

Parameter	Význam parametru
$K_{Bg} = \eta \lambda P_{Bg} T_s / hc$	Priemerný počet fotónov za PPM slot v závislosti na okolitom žiarení s výkonom $P_{Bg}$
$\bar{g}$	Priemerný zisk APD
$q$	Elektrický náboj
$F \approx 2 + \zeta \bar{g}$	Faktor šumu APD
$\zeta$	APD jonizačný faktor
$\sigma_{Th}^2 = (2\kappa T_e q / R_L)(T_s)$	Ekvivalentný termálny šum počítaný v rámci periódy PPM slotu
$R_b = 1/T$	Prenosová rýchlosť
$\kappa$	Boltzmannová konštanta
$R_L$	Ekvivalentný záťažový odpor

V prítomnosti log-normálnej atmosférickej turbulencie, nepodmienené BER pre binárny PPM modulovaný FSO získané priemerovaním 6.25 cez štatistiky scintilácie môže byť aproximované ako:

$$P_e \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^n w_i Q \left( \frac{e^{(2(\sqrt{2}\sigma_k x_i + m_k))}}{F e^{(\sqrt{2}\sigma_k x_i + m_k)} + K_n} \right), \quad (6.26)$$

kde  $[w_i]_{i=1}^n$  a  $[x_i]_{i=1}^n$  sú váhové faktory a nuly  $n$ -tého rádu Hermitovho polynómu.  $m_k$  reprezentuje strednú hodnotu  $\ln(K_s)$ ,  $K_n = \left(\frac{2\sigma_{Th}^2}{(\bar{g}q)^2}\right) + 2FK_{Bg}$  a  $\sigma_k^2 = \ln(\sigma_n^2 + 1)$ . Je pozoruhodná, že fluktuácia strednej hodnoty počtu  $K_s$ , je vyvolaná atmosférickou turbulenciou a jeho celkový priemer je daný následovne:

$$E[K_s] = e^{\left(\frac{\sigma_k^2}{2} + m_k\right)}. \quad (6.27)$$

Pre M-PPM systémy má BER, označovaná  $P_e^M$ , hornú hranicu danú : [6][7]

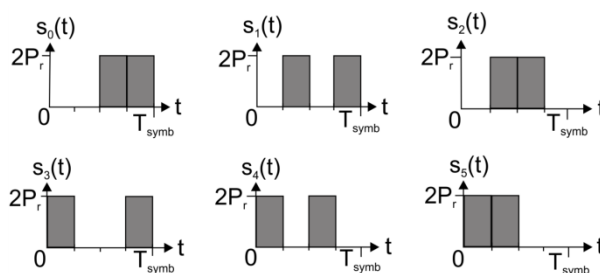
$$P_e^M \leq \frac{M}{2\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^n w_i Q\left(\frac{e^{(z(\sqrt{2}\sigma_k x_i + m_k))}}{Fe^{(\sqrt{2}\sigma_k x_i + m_k) + K_n}}\right). \quad (6.28)$$

### 6.4.1 Varianty PPM

Najväčším nedostatkom PPM schémy je obmedzená pásmová účinnosť. Navyše, v non-LOS konfiguráciách, je PPM menej efektívna pri vysokých prenosových rýchlostiach, čo je spôsobené viaccestným šírením a z toho vyplývajúcimi medzisymbolovými interferenciami. Snahou zlepšiť pásmovú účinnosť, bolo vyvinutých niekoľko modifikovaných PPM schém. Patria medzi ne schémy: DPPM, viacúrovňová PPM (MPPM) a ďalšie. [7]

#### 6.4.1.1 MPPM schéma

V MPPM, je každý symbol s dobou trvania  $T_{\text{symp}} = T_b \log_2 L$  rozdelený na  $n$  slotov, každý s dobou trvania  $T_{\text{symp}}/n$ . Impulz je prenesený vo  $w$  slotoch, tým dostaneme  $\binom{n}{w}$  možných symbolov a tým potenciálne  $\log_2 \binom{n}{w}$  bitov na zakódovanie. Týmto je poskytnutá vyššia pásmová účinnosť v porovnaní so štandardnou PPM schémou. Ako príklad môže poslúžiť  $\binom{4}{2}$  MPPM, ktorá má 6 možných symbolov tak, ako je zobrazené na obrázku 6.9. [7]



Obrázok 6.9: Možnosti symbolov  $\binom{4}{2}$  MPPM

#### 6.4.1.2 DPPM schéma

Diferenciálna PPM, ktorá môže byť tiež považovaná za invertovanú DPIM, zlepšuje ako výkonovú účinnosť, tak aj pásmovú účinnosť alebo priepustnosť, odstránením prázdnych slotov nasledujúcich po impulze v PPM symbolu. Priemerný počet slotov v DPPM je takmer polovičný oproti PPM. To poskytuje možnosť na zlepšenie dátovej priepustnosti alebo pásmovej účinnosti.

Aj keď každý DPPM symbol končí impulzom, teda poskytuje vlastnú symbolovú synchronizáciu v prijímači, jeden chybný slot neovplyvní len príslušný symbol, ale ovplyvní aj nasledujúce symboly. Tým nastávajú viacsymbolové chyby. Existujú dva možné scenáre:

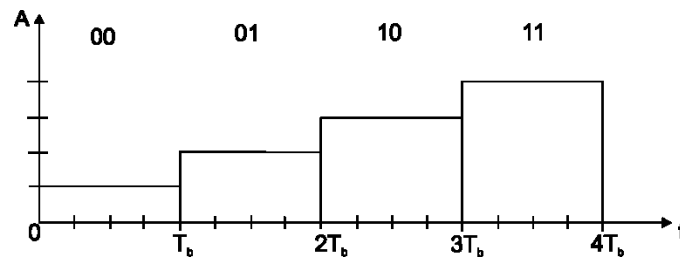
- Chyba falošným poplachom – impulz je detegovaný v prázdnom slotе nasledovanom impulzom na konci symbolu, čo vedie k tomu, že ďalší symbol bude chybnе demodulovaný.
- Chyba zmazaním – šum spôsobí, že impulz je prijatý ako prázdny slot, čo vedie k tomu, že jeden impulz s preneseným symbolom bude vymazaný a ďalší symbol bude chybnе demodulovaný

Treba však poznamenať, že ak chybné sloty vyústia v postupnosť prázdnych slotov dlhšou ako  $L - 1$  slotov, potom bude chyba detegovaná, inak nie.

Pre AWGN kanály a akékoľvek  $L$ , má DPPM v porovnaní s PPM mierne vyššie výkonové požiadavky, ale oveľa menšie požiadavky na šírku pásma. [7]

## 6.5 Impulzná amplitúdová modulácia (PAM)

V impulznej amplitúdovej modulácii je informácia prenášaná vo veľkosti amplitúdy jednotlivých impulzov. Pri tomto type modulácie sa mení amplitúda impulzov, pričom poloha a doba trvania impulzov ostáva rovnaká. [10] Príklad tejto modulácie je na obrázku 6.10.



Obrázok 6.10: Impulzná amplitúdová modulácia PAM

BER pre M-PAM schémy môže byť vyjadrená nasledovne:

$$BER_{PAM} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{SNR} \log_2 M}{2\sqrt{2}(M-1)} \right). \quad (6.29)$$

Keďže „ $M$ “ je počet možných impulzov s rôznou amplitúdou pre „ $K$ “ bitov informácie v M-PAM, t.j. „ $M = 2^K$ “, bitová rýchlosť môže byť vyjadrená rovnicou 6.x2.

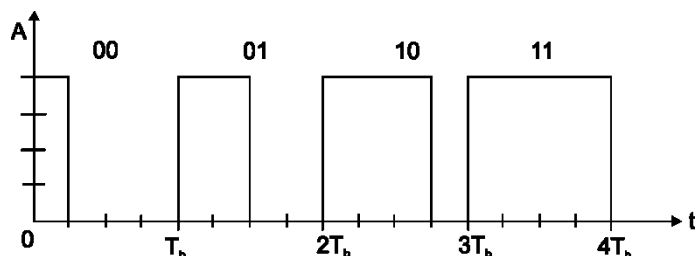
$$R_b = B_{req} \log_2 M = B_{req} K \quad (6.30)$$

Dosadením „ $M = 2^K$ “ do rovnice 6.x1 môžeme BER vyjadriť ako funkciu počtu bitov, čo je ukázané v rovnici 6.x3. [19]

$$BER_{PAM} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{SNR} K}{2\sqrt{2}(2^K-1)} \right) \quad (6.31)$$

## 6.6 Impulzná šírková modulácia (PWM)

V impulznej šírkovej modulácii PWM je informácia vyjadrená pomocou šírky jednotlivých impulzov. Analógový signál je najprv navzorkovaný a potom kvantizovaný, pričom jednotlivé kvantizačné úrovne sú vyjadrené dobou trvania impulzov, teda ich šírkou. Pri tejto modulácii sa mení doba trvania impulzov a amplitúda s polohou impulzov ostávajú rovnaké. [10] Príklad tejto modulácie je na obrázku 6.11.



Obrázok 6.11: Impulzná šírková modulácia PWM

## 6.7 Impulzná intervalová modulácia (PIM)

Existuje niekoľko modulačných schém založených na PIM. Tieto modulačné schémy zlepšujú či už priepustnosť alebo znižujú výkonové požiadavky. Dosahujú to prevzatím komplexných symbolov alebo viacúrovňovou amplitúdou. V PIM je informácia zakódovaná vložím prázdného slotu medzi dva impulzy. V porovnaní s PPM ponúka PIM menšiu zložitosť a to z dôvodu jej vstavanej symbolovej synchronizácie.

### 6.7.1 DPIM

Najjednoduchšou metódou PIM je DPIM, ktorá v porovnaní s PPM ponúka zlepšenie výkonu odstránením nadbytočného miesta v PPM. Preto je DPIM anizochrónna modulačná technika, v ktorej je každý blok vstupných dátových bitov o veľkosti  $M$  mapovaný na jeden z  $L$  možných symbolov rôznych dĺžok. Symbol je zložený z impulzu s dĺžkou doby trvania jedného slotu, ktorý je nasledovaný sériou prázdnych slotov. Počet týchto prázdnych slotov závisí na decimálnej hodnote  $M$ -bitového kódovaného dátového toku. Potom je minimálna a maximálna doba trvania symbolu  $T_s$ , respektíve  $LT_s$ , kde  $T_s$  je doba trvania jedného slotu. Za účelom poskytnutia nejakej imunity na efekt ISI, môže byť hneď za impulzom pridané ochranné pásmo, ktoré je zložené z jedného alebo viacerých prázdnych slotov. Tým sa teda zmení aj minimálna a maximálna doba trvania symbolu na  $2T_s$ , respektíve  $(L + 1)T_s$ . Mapovanie zdrojových dát na prenosové symboly pre 4-DPIM s ochranným pásmom pozostávajúcim z jedného ochranného slotu (1GS) a bez ochranného slotu, je zobrazené na obrázku 6.12. [7]

Zdrojové dáta	4-DPIM symboly	
	NGB	1GS
00		
01		
10		
11		

Obrázok 6.12: Mapovanie zdrojových dát na prenosové symboly pre 4-DPIM

V skutočnosti sú DPIM symboly zrkadlové obrazy DPPM symbolov, preto vyžadujú rovnakú šírku pásma a rovnaký priemerný výkon. [18]

### 6.7.2 DH-PIM

V DH-PIM,  $n$ -tý symbol  $S_n(h_n, d_n)$  začína s hlavičkou  $h_n$ , ktorá má dobu trvania  $T_h = (\alpha + 1)/T_s$ , a končí sa sekvenciou  $d_n$  prázdných slotov, kde  $T_s$  je doba trvania slotu a  $\alpha > 0$  je celé číslo. V závislosti na najvýznamnejšom bite (MSB) vstupného slova, sú priradené dve rôzne hlavičky  $H_1$  a  $H_2$ , čo zodpovedá  $\text{MSB} = 0$ , respektíve  $\text{MSB} = 1$ . Hlavička  $H_1$  a  $H_2$  má impulz s dobou trvania  $0.5\alpha T_s$ , respektíve  $\alpha T_s$ . Každý impulz je nasledovaný ochrannou skupinou vhodnej dĺžky  $T_g \in \{(\alpha/2 + 1)T_s, T_s\}$  na zabezpečenie symbolov predstavujúcich nuly. Hodnota  $d_n \in \{0, 1, \dots, 2^{M-1} - 1\}$  je decimálna hodnota vstupného kódového slova, keď symbol začína s  $H_1$ , alebo decimálna hodnota jednotkového doplnku vstupného kódového slova, keď symbol začína s  $H_2$ . Hlavičkový impulz hrá dvojitú rolu, iniciáciu symbolu a časovú referenciu pre predchádzajúce a nasledujúce symboly, čoho je výsledkom vstavaná symbolová synchronizácia. Preto DH-PIM nielenže odstraňuje redundantné časové sloty, ktoré nasledujú impulz (ako v PPM symboloch), ale taktiež redukuje priemernú dĺžku symbolu v porovnaní s PIM, výsledkom čoho je zvýšenie dátovej priepustnosti.

Počiatkový čas  $n$ -tého symbolu je definovaný ako

$$T_n = T_0 + T_s [n(\alpha + 1) \sum_{k=0}^{n-1} d_k]. \quad (6.32)$$

Pre  $DH - PIM_\alpha$  je priemerná dĺžka symbolu  $\bar{L}_{DH-PIM}$  a doba trvania slotu  $T_{s,DH-PIM}$  daná ako

$$\bar{L}_{DH-PIM} = \frac{(2^{M-1} + 2\alpha + 1)}{2} \quad (6.33)$$

$$T_{s,DH-PIM_\alpha} = \frac{2M}{(2^{M-1} + 2\alpha + 1)R_b}. \quad (6.34)$$

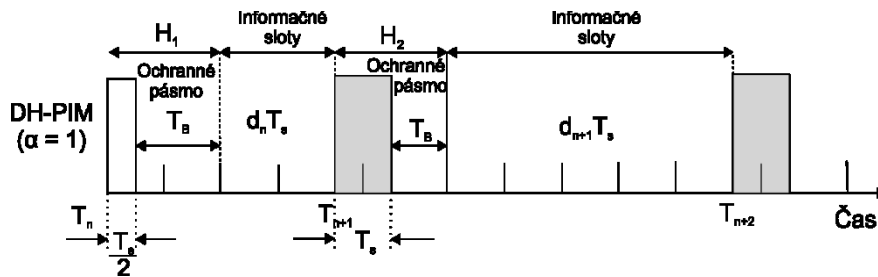


Priemerná dĺžka symbolu v DH-PIM môže byť redukovaná správnym výberom  $\alpha$ , čím ponúkne zlepšenie priepustnosti a požiadavkou na šírku pásma oproti DPIM, DPPIM a PPM schémam.

S odvolaním sa na obrázok 6.13, môže byť DH-PIM impulzná postupnosť vyjadrená matematicky ako

$$x(t) = \frac{4\bar{L}_{DH-PIM}P_r}{3\alpha} \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ p \left[ \frac{2(t-T_k)}{\alpha T_s} - \frac{1}{2} \right] + h_n p \left[ \frac{2(t-T_k)}{\alpha T_s} - \frac{3}{2} \right] \right\} \quad (6.35)$$

kde  $4\bar{L}_{DH-PIM}P_r/3\alpha$  je špičkový prenesený optický výkon,  $h_n \in \{0,1\}$  indikuje  $H_1$ , respektíve  $H_2$ . [7]



Obrázok 6.13: DH-PIM symbolová štruktúra zobrazujúca dve hlavičky ( $H_1$  a  $H_2$ )

## 6.8 Intenzitná Modulácia Subnosnej (SIM)

SIM je technika odvodená z veľmi úspešnej techniky viacerých nosných v rádiových komunikáciách, ktorá je používaná v rôznych aplikáciách ako digitálna televízia, lokálne siete LAN, ADSL, komunikačné systémy 4. Generácie a komunikácie s využitím optických vlákien. V komunikačných sieťach s optickými vláknami, boli techniky modulácie subnosnej prebrané na prenos signálov káblovej televízie a taktiež sú využívané v spojení s WDM. Pre bezproblémovú integráciu FSO systémov do súčasných a budúcich sietí, ktoré už teraz využívajú modulácie subnosných, je nevyhnutné sa venovať štúdiu modulácií subnosných vo FSO systémoch. Ďalšími dôvodmi prečo sa venovať SIM FSO systémom sú:

- SIM profituje z už vyvinutých komponentov RF komunikácií ako sú stabilné oscilátory a úzke filtre.
- Nie je potreba adaptívneho prahu, ktorý je požadovaný u OOK modulovaných FSO pre dosiahnutie optimálneho výkonu.
- Môže byť použitá na zvýšenie kapacity prijímaním dát od rôznych užívateľov na rôznych subnosných.
- Má nižšie nároky na šírku pásma oproti PPM.

Aj u SIM však existujú výzvy, s ktorými je nutné sa vysporiadať:

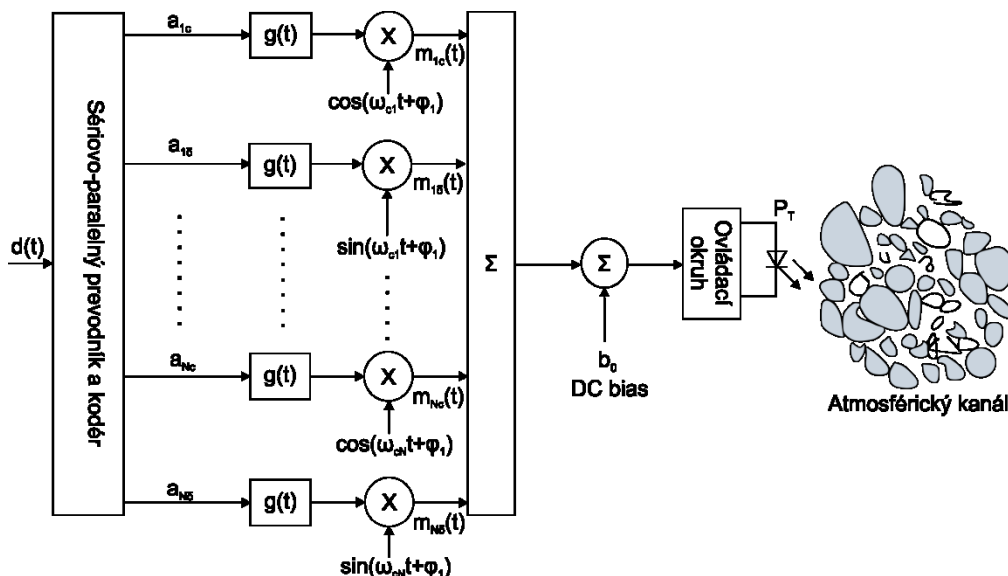
- Relatívne vysoký priemerný prenesený výkon a to v dôsledku:
  - Optický zdroj je zapnutý pri prenose oboch binárnych symbolov "1" a "0", na rozdiel od OOK, kde je zdroj zapnutý len v prípade prenosu bitu "1".

- Elektrický signál zložený s viacerých subnosných je súčtom modulovaných sínusoid (tj. Zahŕňajúc záporné aj kladné hodnoty) vyžaduje kľudový jednosmerný prúd. To má zabezpečiť, že tento zložený elektrický signál, ktorý bude eventuálne modulovať laserové žiarenie, nie je nikdy záporný. Zvyšovanie počtu subnosných vedie k zvyšovaniu priemerného preneseného výkonu, pretože minimálna hodnota zloženého elektrického signálu sa znižuje (stáva sa viac záporná) a vyžadovaný kľudový jednosmerný prúd sa teda zvyšuje. Tento faktor rezultuje v chabú výkonovú účinnosť a obmedzuje počet subnosných, ktoré môžu byť použité pri použití viacnásobnej SIM.
- Možnosť skreslenia signálu v dôsledku:
  - Vlastnej nelinearity lasera.
  - Orezania signálu v dôsledku premodulovania.
- Prísne požiadavky synchronizácie na strane prijímača.

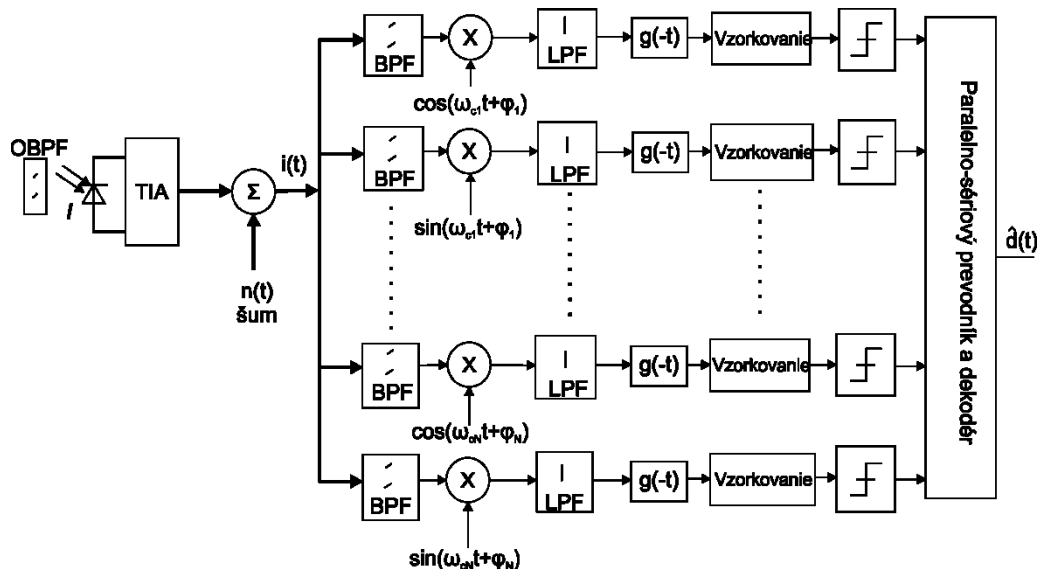
Preto je vhodné spomenúť, že viacnásobnú SIM je odporúčané použiť len vtedy, keď snaha o väčšiu kapacitu/užívateľov prevažuje vyššie spomenuté výzvy, alebo tam kde má byť FSO integrované do existujúcej siete, ktorá už obsahuje viacero RF nosných.

### 6.8.1 SIM generovanie a detekcia

V optickom SIM spojení RF subnosný signál  $m(t)$ , pre-modulovaný so zdrojovými dátami  $d(t)$ , je použitý na moduláciu intenzity  $P_T$  optického zdroja - kontinuálnej laserovej diódy. Obrázky 6.14 a 6.15 zobrazujú blokový diagram SIM-FSO systému s  $N$  subnosnými. Každá subnosná má zníženú symbolovú rýchlosť, ale celkovo musí byť symbolová rýchlosť rovná symbolovej rýchlosti  $d(t)$ .



Obrázok 6.14: Blokový diagram SIM-FSO vysielača



Obrázok 6.15: Blokový diagram SIM-FSO prijímača

Ďalšou možnosťou, nezobrazenou na obrázkoch 6.14 a 6.15, je možnosť mať rôznych užívateľov okupujúcich  $N$  rôznych subnosných. Pred moduláciou laserového žiarenia, sú zdrojové dáta  $d(t)$  namodulované na RF subnosné. Pre M-PSK subnosnú moduláciu zobrazenú na obrázkoch 6.14 a 6.15, mapuje kódovač každý symbol subnosnej na amplitúdu symbolu  $\{a_{ic}, a_{is}\}_{i=1}^N$ , ktorá odpovedá používanej konštelácii. Vzhľadom k tomu, že subnosný signál  $m(t)$  je sínusový, obsahujúci kladné aj záporné hodnoty, pred tým než sa použije na riadenie laserovej diódy sa k nemu pridá jednosmerný prúd s úrovňou  $b_0$ . Predídze sa tak orezaniu signálu.

Nasledujúca rovnica udáva všeobecné vyjadrenie signálu  $m(t)$  v N-SIM-FSO systéme:

$$m(t) = \sum_{i=1}^N m_i(t). \quad (6.36)$$

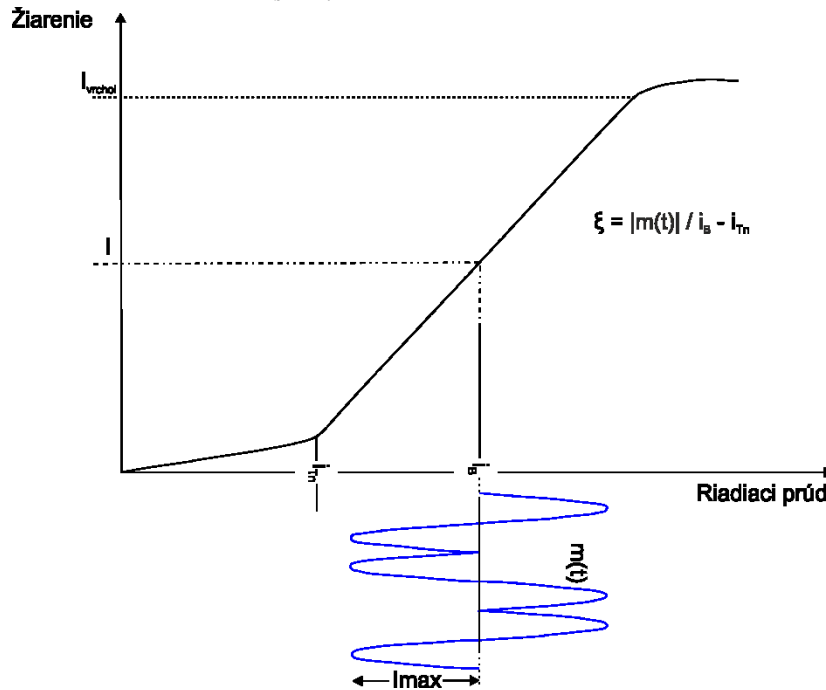
Počas periódy symbolu, je každý RF subnosný signál všeobecne vyjadrený:

$$m_i(t) = g(t)a_{ic} \cos(\omega_{ci}t + \varphi_i) + g(t)a_{is} \sin(\omega_{ci}t + \varphi_i), \quad (6.37)$$

kde  $g(t)$  je tvarovacia funkcia impulzu a uhlová frekvencia a fáza subnosnej sú reprezentované  $[\omega_{ci}, \varphi_i]_{i=1}^N$ . Z toho vyplýva, že každá subnosná môže byť modulovaná akoukoľvek štandardnou RF digitálnou alebo analógovou modulačnou technikou, ako napr.: QAM, M-PSK, M-FSK a M-ASK. Použitím priamej detekcie na prijímači, je prichádzajúce optické žiarenie  $P_R$ , konvertované na elektrický signál  $i(t)$ . Potom nasleduje štandardný RF demodulátor slúžiaci na obnovenie vysielaného symbolu ako je zobrazené na obrázku 6.15. Normalizovaním oblasti prijímača a vyjadrením prijatého výkonu žiarením  $I$ , môže byť prijatý signál modelovaný nasledovne:

$$i(t) = \Re[1 + \xi m(t)] + n(t), \quad (6.38)$$

kde optický index modulácie  $\xi = \left| \frac{m(t)}{i_b - i_{Th}} \right|$ , ako je zobrazené na obrázku 6.16.



Obrázok 6.16: Výstupná charakteristika optického zdroja riadeného subnosným signálom zobrazujúca optický index modulácie

Elektrický filter typu pásmová prepust' (BPF) s minimálnou šírkou pásma  $2R_b$  plní nasledujúce funkcie:

- Výber individuálnej subnosnej pre demoduláciu
- Redukcia šumového výkonu
- Potlačenie akýchkoľvek pomalých zmien  $\Re I$  zložky prítomnej v prijatom signáli

Pre subnosnú na  $\omega_{ci}$  je prijatý signál daný:

$$i(t) = I_{comp} + Q_{comp}, \quad (6.39)$$

kde

$$I_{comp} = \Re I \xi g(t) a_{ic} \cos(\omega_{ci} t + \varphi_i) + n_I(t) \quad (6.40)$$

$$Q_{comp} = -\Re I \xi g(t) a_{is} \sin(\omega_{ci} t + \varphi_i) + n_Q(t) \quad (6.41)$$

$n_I(t)$  a  $n_Q(t)$  sú nezávislý aditívny biely Gaussov šum (AWGN) s nulovou strednou hodnotou a odchýlkou  $\sigma^2$ . Tieto kvadráturne zložky  $I_{comp}$  a  $Q_{comp}$  sú skonvertované referenčnými signálmi  $\cos(\omega_{ci} t)$ , resp.  $\sin(\omega_{ci} t)$  a aplikované na štandardnú architektúru prijímača. Elektrické filtre typu dolná prepust', ktoré sú súčasťou štandardných RF prijímačov, odstraňujú akékoľvek mimo pásmové (nechcené) signály zo skonvertovaného signálu a potom ho prepustia do rozhodovacieho obvodu. V prípade subnosnej modulovanej kľúčovaním fázového posunutia, rozhodovací obvod odhadne fázu prijatého signálu a rozhodne, ktorý symbol bol prijatý. [6][7].

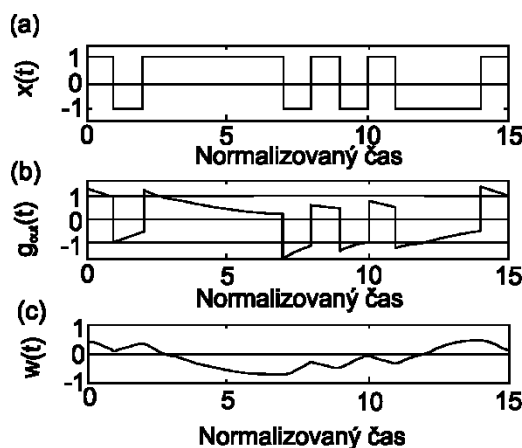
## 7 Modulačné techniky používané vo vnútorných FSO spojeniach

Pre komunikačné systémy na krátke vzdialenosti môžu byť použité rovnaké návrhové a výkonové charakteristiky ako pre komunikačné systémy na dlhé vzdialenosti s jedným rozdielom, pri vnútorných systémoch nie je takmer žiadny efekt atmosférických strát. Výkonový rozpočet spojenia je teda takmer celý daný výkonom vysielača, stratami voľného prostredia a citlivosťou prijímača. Tak ako pri vonkajších spojeniach, tak aj pri vnútorných musí byť zabezpečená bezpečnosť očí, čo vo všeobecnosti znamená použitie LED. Problémom vnútorných systémov je difúzne šírenie lúčov. Toto šírenie má za následok vznik medzysymbolových interferencií (ISI), ktoré významne znižujú prenosové rýchlosti oproti klasickému bod-bod spojeniu.[1] Ďalším problémom môžu byť interferencie spôsobené fluorescenčným žiarením (FLI), ktoré môže taktiež značne degradovať výkon spojenia. [7]

Cieľom návrhu vnútorného komunikačného systému je eliminovať efekt medzysymbolových interferencií tak, aby bolo možné použiť výkonovo účinné modulácie akou je PPM, pre vysoké prenosové rýchlosti. [1]

Spomedzi všetkých modulačných techník, sú najviac používanými modulačnými technikami pre vnútorné FSO systémy OOK, PPM a DPIM [7]. PPM technika vyžaduje zložitejší systém ako OOK technika, pretože pri PPM musí byť na prijímači zachovaná priestorová aj symbolová synchronizácia.[5] Modulácia OOK je detailnejšie popísaná v kapitole 6.1 a modulácia PPM v kapitole 6.4.

V závislosti na použitej modulačnej technike môže prítomnosť FLI vplývať na výkon spojenie rôzne. Impulzné modulačné schémy ako PPM, ktoré majú nízko spektrálne komponenty v alebo blízko DC oblasti, môžu ponúknuť imunitu voči FLI. Na druhej strane, modulačné schémy ako OOK s vysoko spektrálnymi komponentmi blízko DC oblasti, sú viac náchylné na vplyv FLI. Najvyužívanejšou technikou využívanou na zníženie vplyvu FLI je filtrovanie pomocou filtrov typu horná prepust' (HPF). Avšak, HPF vnášajú ďalší typ ISI známy ako putovanie základne. Pre ilustráciu efektu putovania základne uvažujme OOK-NRZ signál s obdĺžnikovým tvarom impulzov ako je zobrazené na obrázku 7.1(a). Výstup  $g_{out}(t)$  HP filtra s cut-off frekvenciou 0,05 krát bitová rýchlosť a príslušným putovaním základne sú zobrazené na obrázkoch 7.1(b) a (c). [7]



Obrázok 7.1: Efekt putovania základne

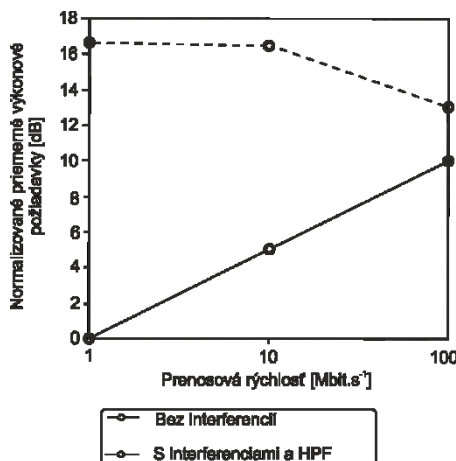
## 7.1 Porovnanie OOK, PPM a DPIM za prítomnosti FLI s použitím HPF

Pre porovnanie rôznych modulačných schém sú použité dva kľúčové parametre:

- Normalizovaný požadovaný optický výkon (NOPR): NOPR systému je vypočítaný normalizovaním pomeru optického výkonu potrebného na dosiahnutie určenej bitovej/slotovej pravdepodobnosti chyby  $\xi$  v interferujúcom kanáli k výkonu potrebného na dosiahnutie určitej  $\xi$  v OOK systéme pri bitovej rýchlosti  $1 \text{ Mbit.s}^{-1}$  v ideálnom AWGN kanáli bez interferencií.
- Optický výkonový postih (OPP): OPP systému je vypočítaný normalizovaním pomeru optického výkonu potrebného na dosiahnutie určenej bitovej/slotovej pravdepodobnosti chyby  $\xi$  v interferujúcom kanáli k výkonu potrebného na dosiahnutie určitej  $\xi$  v ideálnom AWGN kanáli bez interferencií.

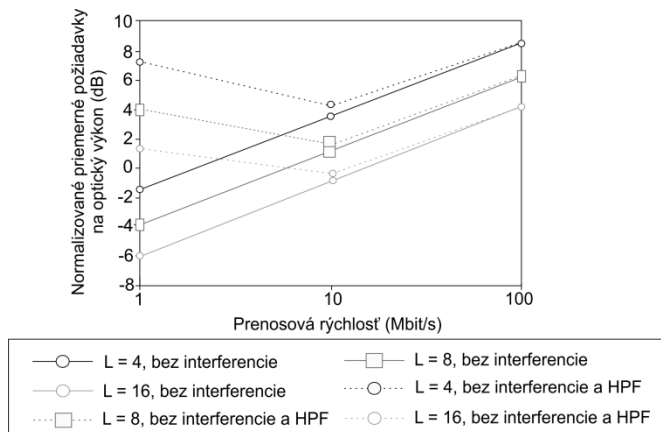
Na obrázkoch 7.2 až 7.5 sú zobrazené priemerné požiadavky na optický výkon pre OOK, PPM(HDD), PPM(SDD) a DPIM pri bitových rýchlostiach 1, 10, 100  $\text{Mbit.s}^{-1}$  za použitia optimálnych normalizovaných cut-on frekvencií v HPF.

Podľa obrázku 7.2 nie je filtrovanie pri rýchlostiach 1 a 10  $\text{Mbit.s}^{-1}$  efektívne. Je to z dôvodu, že OOK je veľmi citlivá na putovanie základne a preto je možné použiť len nízke normalizované cut-on frekvencie, ktoré nie sú pri nízkych rýchlostiach efektívne v utlmení interferenčného signálu. Pri rýchlosti 100  $\text{Mbit.s}^{-1}$  je filtrovanie efektívnejšie, čím znižuje požiadavky na optický výkon približne o 4,4 dB. Avšak, v porovnaní s kanálom bez FLI je pri rovnakej prenosovej rýchlosti výkonový postih 3 dB.

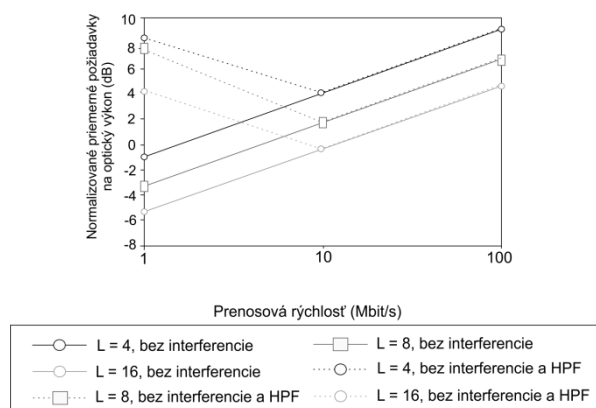


Obrázok 7.2: Normalizované priemerné požiadavky na optický výkon vzhľadom na prenosovú rýchlosť pre OOK s FLI a optimalizovaným HP filtrovaním

Na rozdiel od OOK, pri PPM(HDD) vykazuje HPF zníženie priemerného požiadavku na optický výkon už pri rýchlosti 1 Mbit.s<sup>-1</sup>. Pri 100 Mbit.s<sup>-1</sup> nastáva zhoda medzi výkonovými křivkami, čo indikuje, že HPF dokáže dostatočne utlmiť interferenčný signál bez vloženia vplyvu putovania základne.

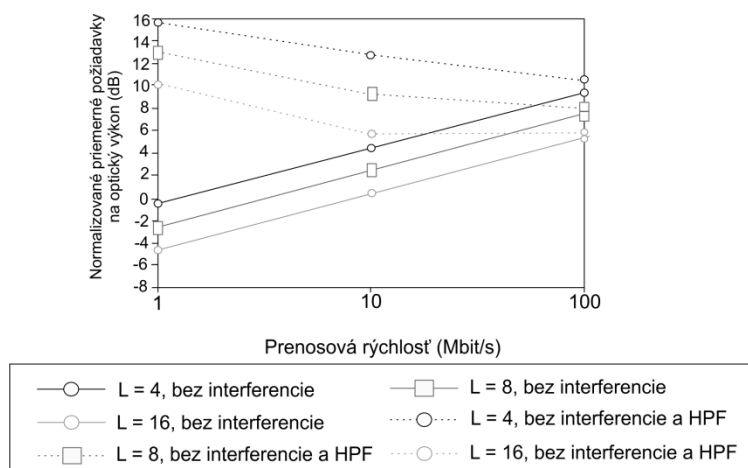


Obrázok 7.3: Normalizované priemerné požiadavky na optický výkon vzhľadom na prenosovú rýchlosť pre PPM(HDD) s FLI a optimalizovaným HP filtrovaním



Obrázok 7.4: Normalizované priemerné požiadavky na optický výkon vzhľadom na prenosovú rýchlosť pre PPM(SDD) s FLI a optimalizovaným HP filtrom

V PPM (SDD) bez HPF je len malý výkonový postih pri rýchlostiach väčších ako  $10 \text{ Mbit.s}^{-1}$ . Preto je pri použití HPF viditeľné len minimálne zlepšenie. Znamená to, že PPM (SDD) je pri vyšších rýchlostiach odolné na FLI.



Obrázok 7.5: Normalizované priemerné požiadavky na optický výkon vzhľadom na prenosovú rýchlosť pre DPIM s FLI a optimalizovaným HP filtrom

Pri DPIM modulácii je vidieť, že priemerné požiadavky na optický výkon sa so zvyšujúcou prenosovou rýchlosťou znižujú pri použití HPF.

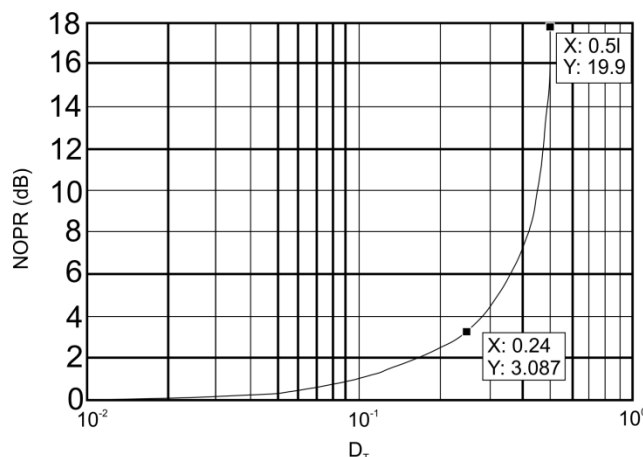
Z porovnania všetkých štyroch obrázkov je zrejmé, že PPM má najlepšiu odolnosť na interferencie spôsobené okolitým svetlom. [7]

## 7.2 Výkonnosť spojenia pri viaccestnom šírení

Tak ako v predchádzajúcej kapitole, aj tu sú použité na porovnanie modulácii parametre NOPR a OPP. Na obrázku 7.6 je zobrazené NOPR v závislosti na zvyšujúcom sa normalizovanom oneskorení šírenia  $D_T$ . [7] Normalizované oneskorenie šírenia je bezrozmerný



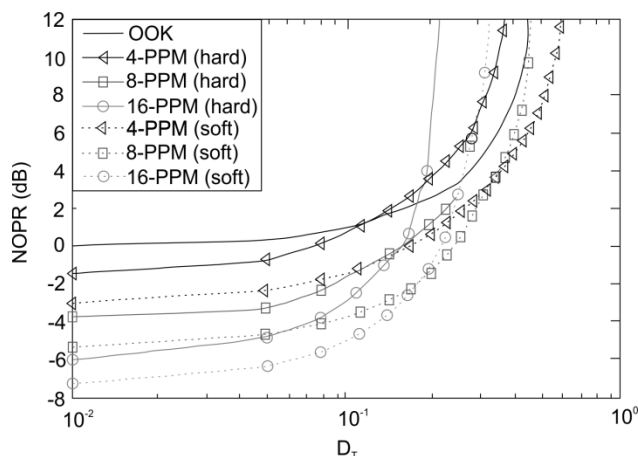
parameter, ktorý je definovaný ako RMS oneskorenie šírenia  $D_{T(RMS)}$  podelené dobou trvania bitu. Je jasne vidieť, že sa NOPR pri OOK exponenciálne zvyšuje s  $D_T$ . [20] Ak  $D_T$  dosiahne hodnotu 0,51, NOPR je približne 18 dB. Ak sa  $D_T$  ešte zvýši, výkonové požiadavky začínajú ísť do nekonečna a slotová chybovosť  $SER = 10^{-6}$  je prakticky nedosiahnuteľná. [7]



Obrázok 7.6: NOPR vzhľadom na  $D_T$  pre neekvalizované OOK v difúznom vnútornom FSO kanáli

Uvažovaním rovnakej prenosovej rýchlosti, bude mať PPM oproti OOK väčšie kanálové rozpätie z dôvodu kratšej doby trvania impulzov, výsledkom čoho je vyšší počet ISI pre rovnaké normalizované oneskorenie šírenia (normalizované k dobe trvania bitu). Tak ako v prípade OOK, aj v prípade PPM je potrebné na určenie pravdepodobnosti chyby vo viacestnom kanáli uvažovať o všetkých možných kombináciách PPM symbolov v rámci kanálového rozpätia. Treba vypočítať slotovú pravdepodobnosť chyby jedného slotu a tú potom spriemerovať cez celé kanálové rozpätie.

Na obrázku 7.7 je zobrazené NOPR na dosiahnutie  $SER = 10^{-6}$  pre neekvalizované 4, 8, 16-PPM modulácie s HDD a HDD schémami. Pre porovnanie graf taktiež zobrazuje NOPR pre OOK.

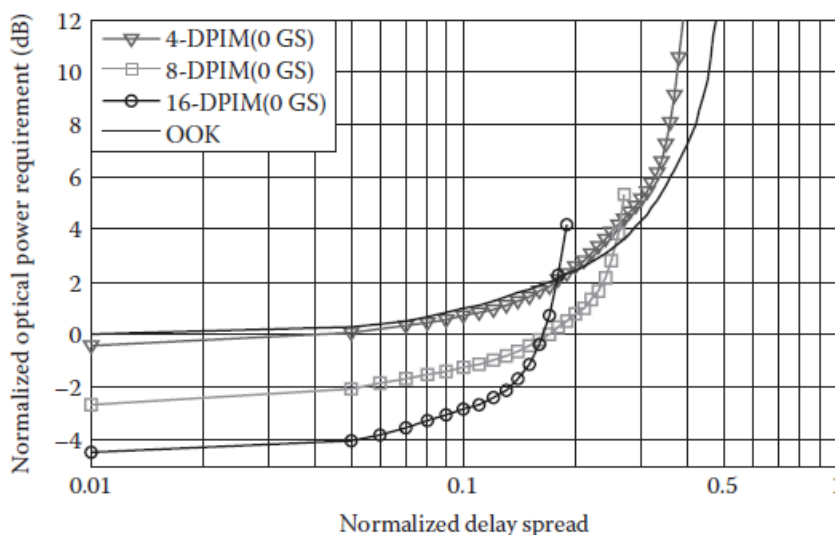


Obrázok 7.7: NOPR vzhľadom na  $D_T$  pre 4, 8 a 16-PPM s HDD a SDD v difúznom kanáli

Pre akýkoľvek daný rád a oneskorenie šírenia má SSD schéma nižšie výkonové požiadavky ako HDD schéma. V ideálnom kanáli je tento rozdiel asi 1,5 dB, ale pre viaccestné kanály sa tento rozdiel zvyšuje so zvyšujúcim sa  $D_T$ . Pre obe schémy vykazuje vyšší rád PPM ostré zvýšenie NOPR so zvyšujúcim sa  $D_T$ . Je to z dôsledku znižovania doby trvania slotu pri vyšších rádoch PPM, efektívne zvyšujúcemu sa ISI. Napríklad pre  $D_T > 0,19$  4-PPM(HDD) ponúka nižšie NOPR oproti 16-PPM(HDD). Pre SSD schému je priesečník 4-PPM a 16-PPM približne na hodnote 0,24. SSD schéma taktiež ponúka najmenšie výkonové požiadavky pri vyšších hodnotách  $D_T$ . Rozdiel v NOPR sa medzi SDD a HDD schémami zvyšuje od 1,5 dB pre  $D_T = 0$  až po 8,5 dB pre  $D_T \sim 0,4$ , pričom 4-PPM schéma s SDD má vždy menšie požiadavky na NOPR. Rozdiel je ešte väčší pri 8 a 16-PPM, keď pri 16-PPM je to až 12,5 dB pre  $D_T \sim 0,23$ . Toto jasne ukazuje výhody SDD nad HDD v difúzných kanáloch.

Napriek zlepšenej výkonovej účinnosti SDD je evidentné, že OOK prekonáva 16-PPM pre  $D_T \sim 0,3$  a ponúka podobné priemerné OPR ako 8-PPM pre  $D_T \sim 0,3$ . Ďalej v porovnaní s PPM(HDD) ponúka OOK nižšie priemerné OPR ako všetky ostatné rády PPM uvažujúc normalizované oneskorenie šírenia nad 0,27.

Na ďalšom obrázku 7.8 sú zobrazené priemerné požiadavky na optický výkon pre moduláciu DPIM(NGB) v rozmedzí  $D_T$  od  $10^{-3}$  až 0,4. Pre porovnanie je taktiež zobrazená aj modulácia OOK. Pri absencii viaccestného šírenia alebo keď je normalizované oneskorenie šírenia malé, má PPM s HDD menšie NOPR než DPIM s akýmkoľvek rádom. Avšak z dôvodu nižších nárokov na šírku pásma, má DPIM oproti PPM menší výkonový postih indukovaný ISI.



Obrázok 7.8: NOPR vzhľadom na  $D_T$  pre 4,8 a 16-DPIM v difúznom kanáli

Napríklad na  $D_T = 10^{-2}$  má PPM NOPR menší o 1 dB pre  $L = 4$  a o 1,1 dB pre  $L = 16$  než u DPIM. Avšak ak sa  $D_T = 0,2$  je to DPIM, ktorá prekonáva PPM o  $\sim 0,8$  dB pre  $L = 4$  a o 0,6 dB pre  $L = 8$ . Naopak, pre daný rád, PPM(SDD) vždy dosiahne nižšie NOPR ako DPIM.

V porovnaní s OOK dosiahnu všetky rády DPIM menšie NOPR pre  $D_T$  pod 0,18. Avšak za  $D_T \sim 0,26$  je to práve OOK, ktorá dosahuje najnižšie NOPR.

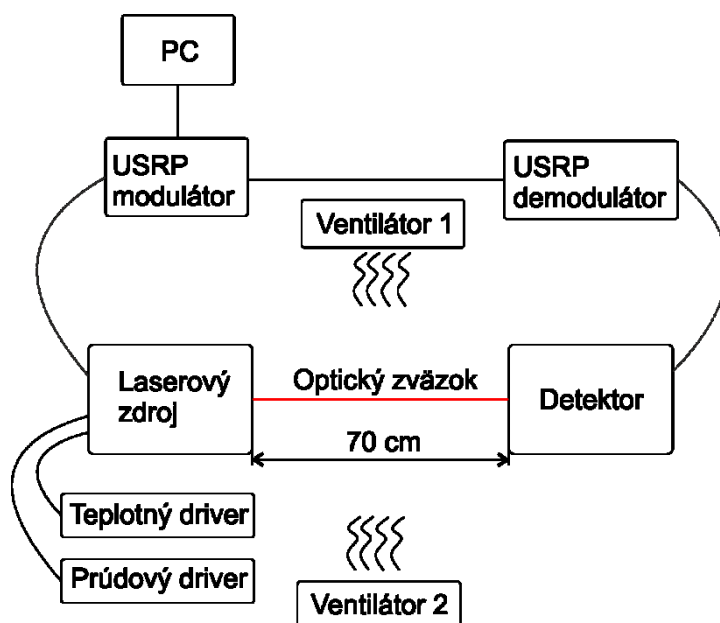
Pre DPIM sekvenciu slotov šíriacich sa cez viaccestný kanál sa postkurzorové ISI najviac vyskytujú v slotoch, ktoré sú hneď za impulzom. Preto umiestnenie ochranného slotu, alebo slotov, hneď za impulzom, zvyšuje odolnosť DPIM na ISI spôsobené viaccestným šírením. Na prijímači, pri detekcii impulzu, sú časové sloty v rámci ochranného pásma označené ako nulové bez ohľadu na to, či je vzorkovaný výstup filtra prijímača nad alebo pod prahovou úrovňou. Preto teda postkurzorové ISI prítomné v týchto slotoch nemajú žiadny efekt na výkon systému za predpokladu, že je impulz iniciujúci DPIM symbol správne detegovaný. [7]

## 8 Testovanie vplyvu turbulencií na vybrané modulácie

Ako bolo spomenuté už v kapitole 2.3, turbulencie sú jedným z atmosférických javov, ktoré negatívne vplyvajú na atmosférické bezvláknové spojenie. Turbulencie spôsobujú zmeny indexu lomu pozdĺž trasy optického žiarenia.

### 8.1 Zapojenie meracieho pracoviska a nastavenie prístrojov

V praktickom meraní boli turbulencie simulované pomocou dvoch teplovzdušných ventilátorov, ktoré pôsobili prúdom teplého vzduchu kolmo na optický zväzok. Optický zväzok bol modulovaný pomocou modulácií PSK a QAM. Na obrázku 8.1 je zobrazené blokové schéma zapojenia pracoviska pretestovanie vplyvu turbulencií.

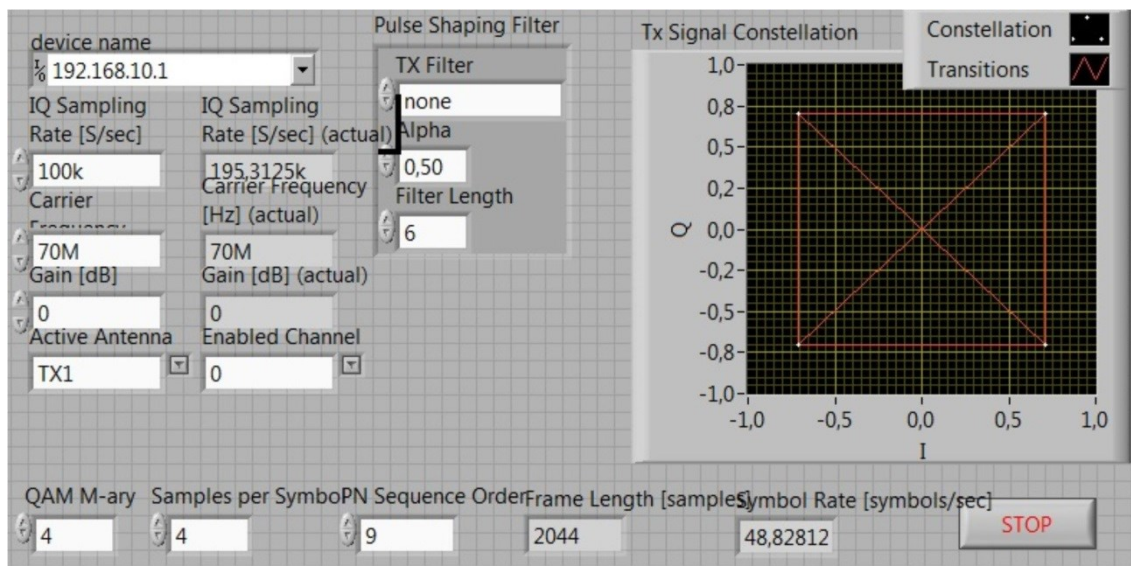


Obrázok 8.1: Blokové schéma meracieho pracoviska na testovanie vplyvu turbulencií na modulácie

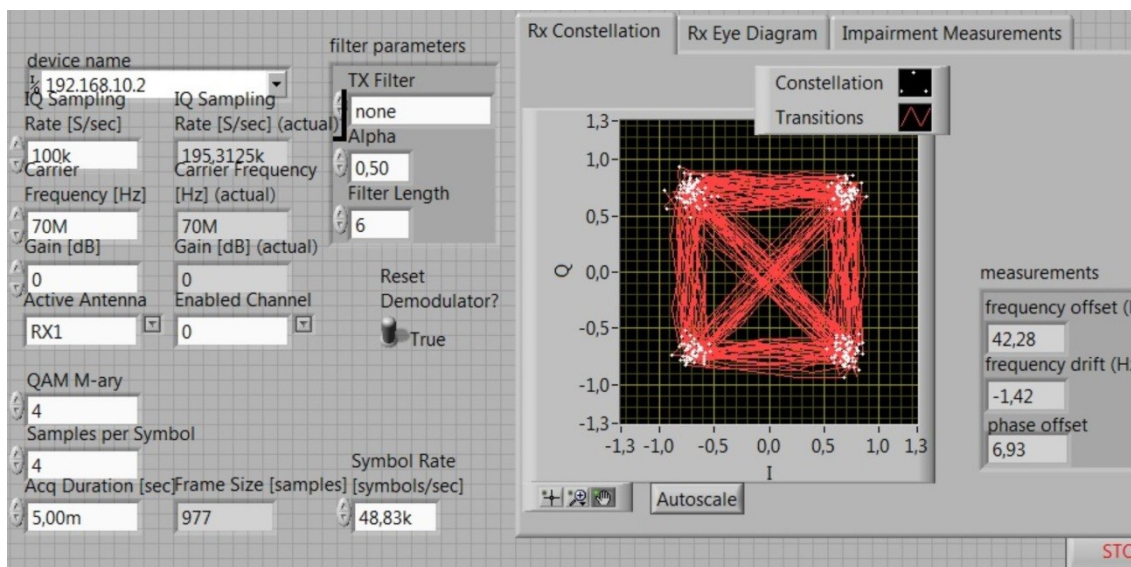
Na testovanie boli použité dva typy laserových diód. Prvou bola LD typu ML925B45F [34], ktorá pracuje na vlnovej dĺžke 1550 nm, a druhou bola LD typu P850L010 [35], ktorá pracuje na vlnovej dĺžke 850 nm. Tieto LD boli umiestnené v teplotne riadenom držiaku laserových diód Thorlabs TCLDM9. Detektor bol taktiež od spoločnosti Thorlabs a to typ PDA10CF-EC [36]. Vzdialenosť medzi zdrojom a detektorom bola nastavená na 70 cm. Na optický zväzok pôsobili dva teplovzdušné ventilátory o výkone 2 kW. Teplota na teplotnom driveri bola nastavená na 25 °C a prúd na prúdovom driveri na 12,8 mA.

Na modulovanie a demodulovanie signálu boli použité prístroje USRP N210. Tieto prístroje boli prepojené a pomocou gigabitového ethernetového kábla spojené s PC. V PC bola

na ovládanie USRP prístrojov použitá aplikácia vytvorená v softvéri Labview. Ovládací panel generátora a demodulátora modulácie QAM je zobrazený na obrázku 8.2, resp. 8.3.



Obrázok 8.2: Aplikácia na generovanie modulácie QAM



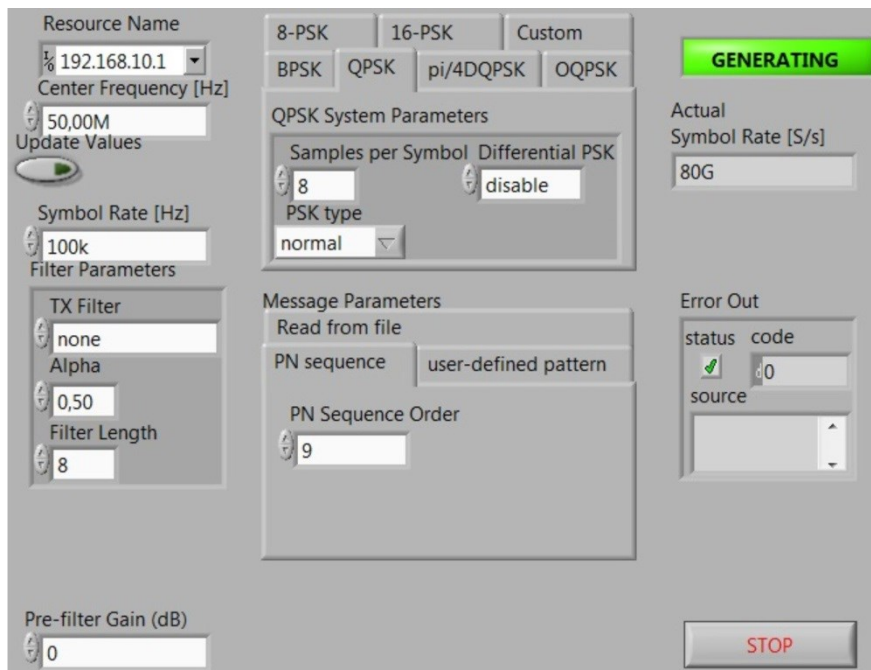
Obrázok 8.3: Aplikácia na demodulovanie modulácie QAM

Na obrázkoch 8.2 a 8.3 je možné vidieť nastavenia aplikácií, ktoré boli použité na generovanie a demodulovanie modulácie QAM. Základom bolo nastavenie IP adres, pomocou ktorých bolo možné pristupovať na USRP. Pre testovanie boli vypnuté všetky filtre a zisk bol nastavený na nulu. Nosná frekvencia bola nastavená na 70 MHz, symbolová rýchlosť

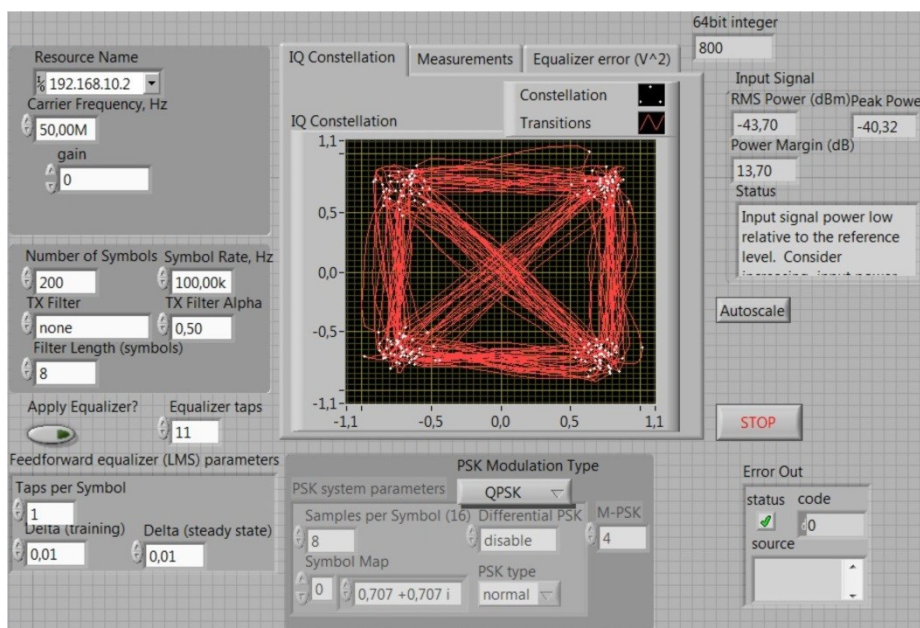
## Testovanie vplyvu turbulencií na vybrané modulácie

na 48,83 kBd. Ostatné nastavenia je možné vyčítať z obrázkov. V rámci modulácie QAM boli testované 4-QAM a 8-QAM.

Ďalšou testovanou moduláciou je modulácia PSK. Na obrázkoch 8.4 a 8.5 sú zobrazené príslušné ovládacie panely.



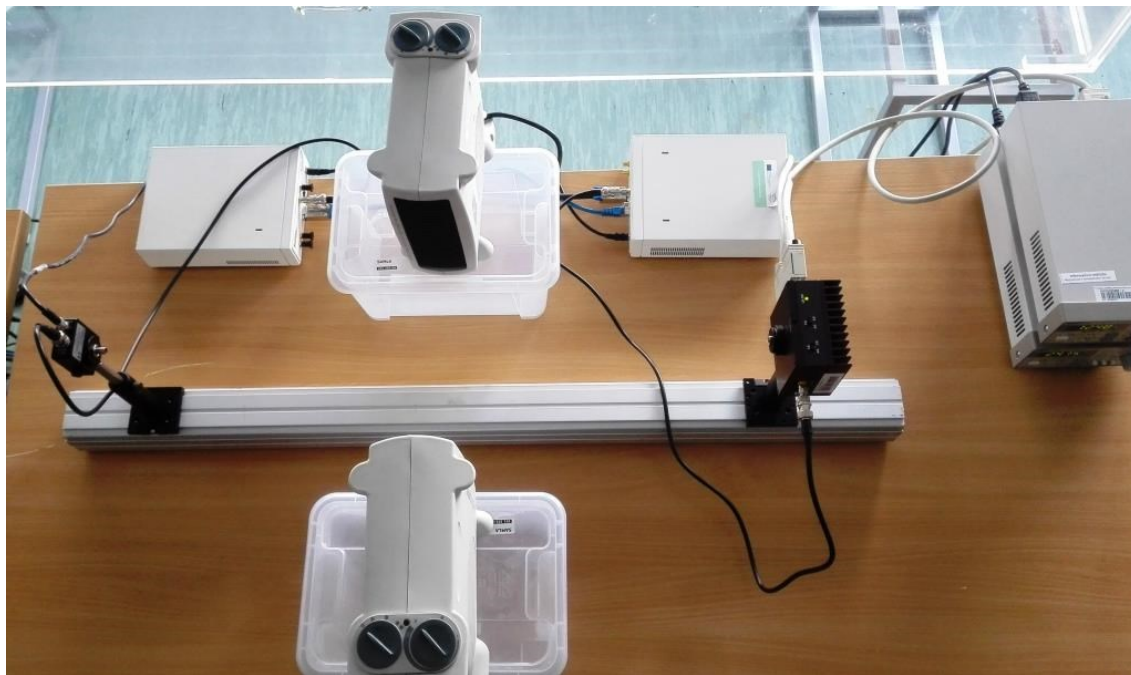
Obrázok 8.4: Aplikácia na generovanie modulácie PSK



Obrázok 8.5: Aplikácia na demodulovanie modulácie PSK



Rovnako ako pri modulácii QAM ja tu je potrebné najprv nastaviť IP adresy pre prístup k USRP zariadeniam. Takisto sú vypnuté všetky filtre a zisk je nastavený na nule. Hlavným rozdielom v nastavení je hodnota nosnej frekvencie, ktorá je u PSK modulácie nastavená na 50 MHz. V rámci modulácie PSK boli testované modulácie QPSK a 8-PSK. Na obrázku 8.6 je zobrazené praktické zapojenie pracoviska.



Obrázok 8.6: Zapojené meracie pracovisko

### 8.2 Výsledky testovania modulácií

Pre porovnanie modulácií bol využitý parameter Modulation Error Ratio (MER). MER je vyjadrením pomeru signálu k šumu (SNR) v digitálne modulovanom signáli. Tak ako SNR je aj MER vyjadrené väčšinou v decibeloch. MER pre N symbolov je definované ako:

$$MER = \frac{\sum_{j=1}^N (I_j^2 + Q_j^2)}{\sum_{j=1}^N [(I_j - \tilde{I}_j)^2 + (Q_j - \tilde{Q}_j)^2]}, \quad (8.1)$$

kde  $I_j$  je zložka I j-teho prijatého symbolu,  $Q_j$  je zložka Q j-teho prijatého symbolu,  $\tilde{I}_j$  je ideálna zložka I j-teho prijatého symbolu a  $\tilde{Q}_j$  je ideálna zložka Q j-teho prijatého symbolu. [41]

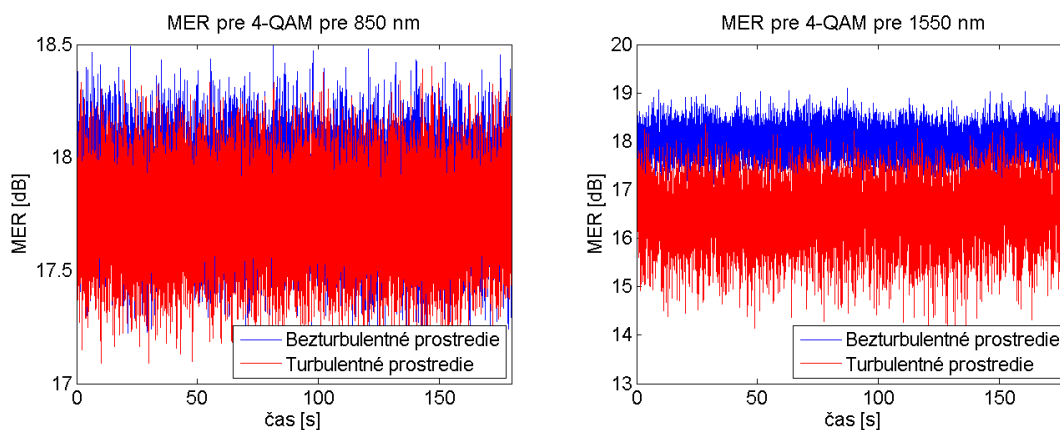
Testovanie každej modulácie prebiehalo v dvoch krokoch. Najprv bolo skúmané ako sa chová modulovaný signál v prostredí bez turbulencií a potom v prostredí s turbulenciami. Každé meranie trvalo tri minúty. Postupne boli nasadzované vybrané modulácie a v nasledujúcich častiach kapitoly sú zobrazené výsledky, štatistické vyhodnotenia a porovnania týchto modulácií.

## 8.2.1 Modulácia QAM

Popis tejto modulácie je uvedený v kapitole 6.3. Pre túto moduláciu boli vybrané dva typy vzhľadom na počet stavov, 4-QAM a 8-QAM.

### 8.2.1.1 Modulácia 4-QAM

Prvou z QAM modulácií je 4-QAM s využitím LD pracujúcej na vlnovej dĺžke 850 nm a 1550 nm. Grafy popisujúce správanie FSO spojenia sú zobrazené na obrázku 8.7.



Obrázok 8.7: Správanie FSO spojenia v prostredí s turbulenciou a bez turbulencie pri modulácii 4-QAM pre  $\lambda=850$  nm (vľavo) a  $\lambda=1550$  nm (vpravo)

Na obrázku 8.7 (vľavo) je vidieť, že vplyv turbulencií na optický zväzok pri použití LD pracujúcej na vlnovej dĺžke 850 nm je minimálny. Voľným okom je možné pozorovať, že rozptyl hodnôt je približne rovnaký. Jediným zhoršením je pokles celkovej úrovne MER v turbulentnom prostredí oproti bezturbulentnému prostrediu avšak, aj tento rozdiel je len minimálny. Naopak, na obrázku 8.7 (vpravo), kde je zobrazený graf pre vlnovú dĺžku 1550 nm, je rozdiel medzi turbulentným a bezturbulentným prostredím oveľa markantnejší. Už na prvý pohľad je viditeľný pokles MER pri turbulentnom prostredí. Taktiež je možné pozorovať zväčšenie rozptylu hodnôt MER v turbulentnom prostredí. Pre spresnenie výsledkov sa v ďalšej časti nachádza štatistické vyhodnotenie, ktoré je urobené pomocou softvéru Statgraphics [37].

### Štatistické vyhodnotenie modulácie 4-QAM

V tabuľke 8.1 sú zobrazené štatistické parametre pre turbulentné aj bezturbulentné prostredie pre vlnové dĺžky 850 nm a 1550 nm.

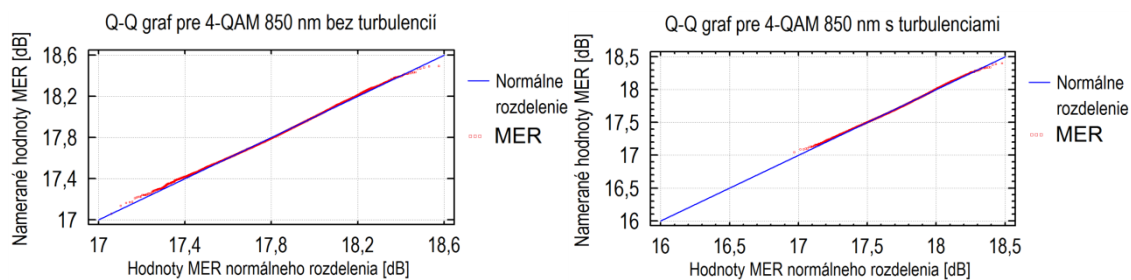


Tabuľka 8.1: Štatistické parametre

	850 nm		1550 nm	
Parameter	Bez turbulencií	S turbulenciami	Bez turbulencií	S turbulenciami
Počet vzoriek	12436	12436	12335	12335
Priemer	17,82	17,72	17,98	16,53
Rozptyl	0,04	0,04	0,09	0,34
Smerodajná odchýlka	0,20	0,19	0,30	0,58
Variačný koeficient [%]	1,10	1,10	1,68	3,54

Tak ako bolo spomenuté už pri vizuálnom posúdení, tak aj teraz vidieť, že hodnoty pre obe prostredia sú veľmi podobné. Nasledujúce testy určujú, či sú dané rozdiely štatisticky významné.

Na obrázku 8.8 sú zobrazené Q-Q grafy pre vlnovú dĺžku 850 nm bez turbulencií (vľavo), resp. s turbulenciami (vpravo). Keďže v oboch prípadoch namerané dáta takmer dokonale opisujú priamku normálneho rozdelenia, môžeme povedať, že hodnoty pochádzajú z normálneho rozdelenia. Na porovnanie priemerov daných prostredí je použitý t-test. Jeho podmienkou je rovnosť smerodajných odchýlok, avšak podľa [38], stačí ak nie je výrazne porušená normalita dát.



Obrázok 8.8: Q-Q grafy pre 850 nm bez turbulencií (vľavo) a s turbulenciami (vpravo)

#### Porovnanie priemerov pomocou t-testu pre $\lambda=850$ nm

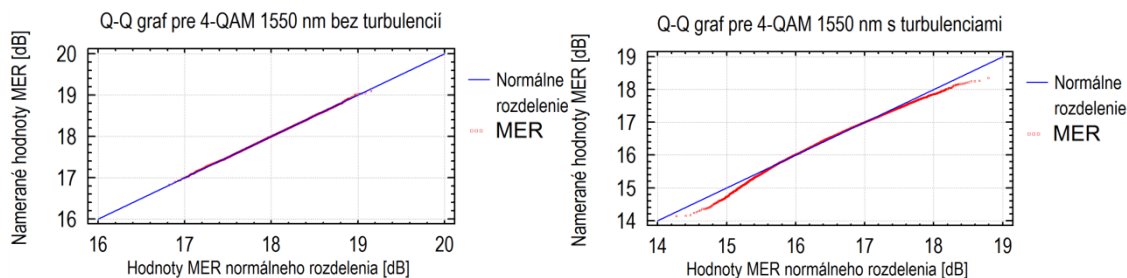
Nulová hypotéza  $H_0$ : priemery daných prostredí sú rovnaké

Alternatívna hypotéza  $H_A$ : priemery daných prostredí nie sú rovnaké

p-hodnota: 0

Rozhodnutie: Na hladine významnosti 0,05 zamietam  $H_0$  (p-hodnota  $\ll 0$ , t-test). Rozdiel medzi priermi daných prostredí je štatisticky významný.

Pre vlnovú dĺžku 1550 nm je použitý rovnaký postup ako pre 850 nm. Na obrázku 8.9 sú zobrazené Q-Q grafy bez turbulencií (vľavo), resp. s turbulenciami (vpravo).



Obrázok 8.9: Q-Q grafy pre 1550 nm bez turbulencií (vľavo) a s turbulenciami (vpravo)

V prípade bezturbulentného prostredia dáta opisujú priamku normálneho rozdelenia úplne, v prípade turbulentného je normalita narušená len mierne. Nasleduje teda porovnanie priemerov v daných prostrediach.

#### Porovnanie priemerov pomocou t-testu pre $\lambda=1550$ nm

Nulová hypotéza  $H_0$ : priemery daných prostredí sú rovnaké

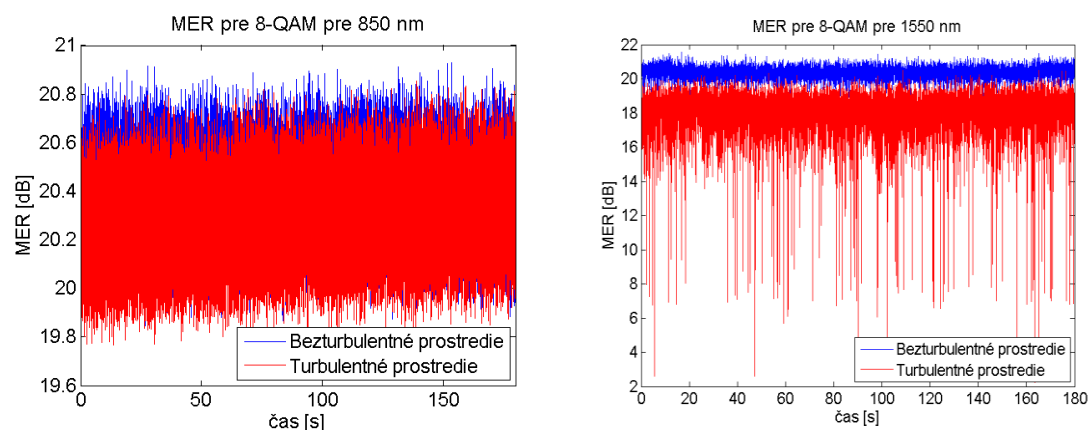
Alternatívna hypotéza  $H_A$ : priemery daných prostredí nie sú rovnaké

p-hodnota: 0

Rozhodnutie: Na hladine významnosti 0,05 zamietam  $H_0$  (p-hodnota  $\ll 0$ , t-test). Rozdiel medzi priermi daných prostredí je štatisticky významný.

#### 8.2.1.2 Modulácia 8-QAM

Na obrázku 8.10 je zobrazený priebeh merania pre moduláciu 8-QAM. Ľavý obrázok zobrazuje priebeh pre vlnovú dĺžku 850 nm a pravý obrázok zobrazuje priebeh pre vlnovú dĺžku 1550 nm.



Obrázok 8.10: Správanie FSO spojenia v prostredí s turbulenciou a bez turbulencie pri modulácii 8-QAM pre  $\lambda=850$  nm (vľavo) a  $\lambda=1550$  nm (vpravo)

Ďalšie porovnanie zobrazené na obrázku 8.10 ukazuje, že ako pri 4-QAM tak aj pri 8-QAM môže byť už vizuálnym posúdením badateľný väčší vplyv turbulencií na optický

zvázok pri použití vlnovej dĺžky 1550. Pokles MER a zvýšenie rozptylu hodnôt turbulentného prostredia oproti bezturbulentnému je markantnejší ako pri  $\lambda=850$  nm. Rovnako ako pri 4-QAM nasleduje štatistické vyhodnotenie.

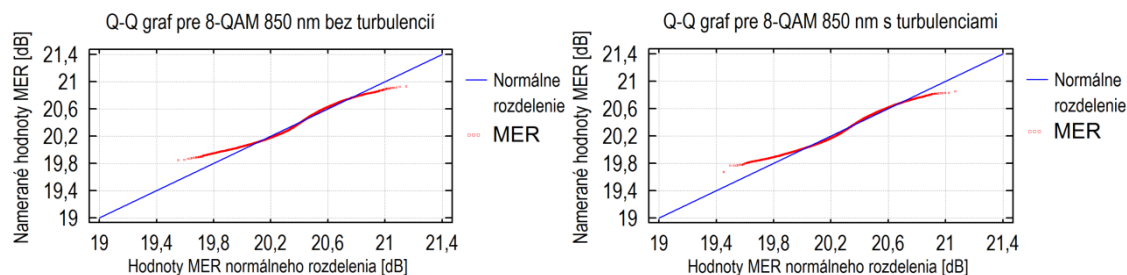
### Štatistické vyhodnotenie modulácie 8-QAM

V tabuľke 8.2 sú zobrazené štatistické parametre pre turbulentné aj bezturbulentné prostredie pre vlnové dĺžky 850 nm a 1550 nm.

Tabuľka 8.2: Štatistické parametre

	850 nm		1550 nm	
Parameter	Bez turbulencií	S turbulenciami	Bez turbulencií	S turbulenciami
Počet vzoriek	16871	16871	12633	12327
Priemer	20,35	20,26	20,35	17,99
Medián	20,32	20,23	20,35	18,22
Rozptyl	0,04	0,04	0,12	1,85
Smerodajná odchýlka	0,20	0,21	0,35	1,36
Variačný koeficient [%]	1,00	1,01	1,73	7,55

Na obrázku 8.11 je zobrazený Q-Q graf pre 850 nm v prostredí bez turbulencie (vľavo) a v prostredí s turbulenciou (vpravo). Namerané dáta neopisujú priamku normálneho rozloženia tak presvedčivo ako pri 4-QAM, preto bude využitý Mann-Whitneyov test na porovnanie mediánov.



Obrázok 8.11: Q-Q grafy pre 850 nm bez turbulencií (vľavo) a s turbulenciami (vpravo)

### Porovnanie mediánov pomocou Mann-Whitneyovho testu pre $\lambda=850$ nm

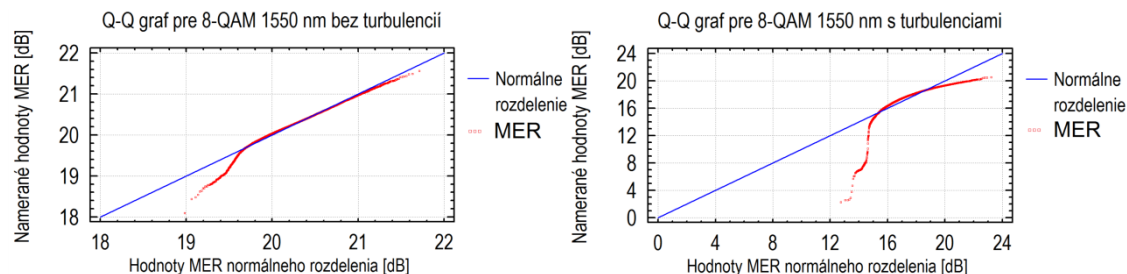
Nulová hypotéza  $H_0$ : mediány daných prostredí sú rovnaké

Alternatívna hypotéza  $H_A$ : mediány daných prostredí nie sú rovnaké

p-hodnota: 0

Rozhodnutie: Na hladine významnosti 0,05 zamietam  $H_0$  (p-hodnota  $\ll 0$ , t-test). Rozdiel medzi priermi daných prostredí je štatisticky významný.

Obrázok 8.12 zobrazuje Q-Q graf pre 1550 nm v prostredí bez turbulencie (vľavo) a v prostredí s turbulenciou (vpravo). Hodnoty v oboch prostrediach sa výrazne líšia od priamky normálneho rozdelenia, preto bude využitý Mann-Whitneyov test na porovnanie mediánov.



Obrázok 8.12: Q-Q grafy pre 1550 nm bez turbulencií (vľavo) a s turbulenciami (vpravo)

### Porovnanie mediánov pomocou Mann-Whitneyovho testu pre $\lambda=1550$ nm

Nulová hypotéza  $H_0$ : mediány daných prostredí sú rovnaké

Alternatívna hypotéza  $H_A$ : mediány daných prostredí nie sú rovnaké

p-hodnota: 0

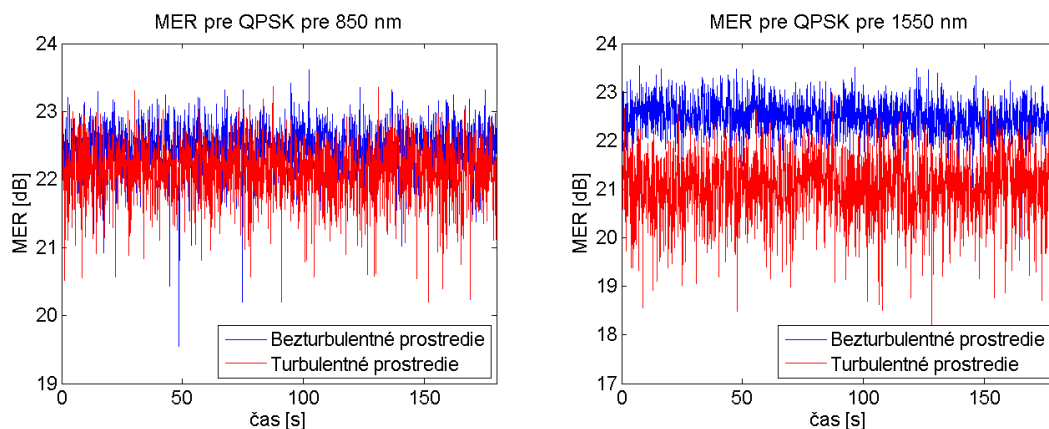
Rozhodnutie: Na hladine významnosti 0,05 zamietam  $H_0$  (p-hodnota  $\ll 0$ , t-test). Rozdiel medzi mediánmi daných prostredí je štatisticky významný.

## 8.2.2 Modulácia PSK

Popis tejto modulácie je uvedený v kapitole 6.2. Pre túto moduláciu boli vybrané dva typy vzhľadom na počet stavov, štvorstavová QPSK a 8-PSK. Tieto modulácie boli taktiež testované na dvoch vlnových dĺžkach, 850 nm a 1550 nm.

### 8.2.2.1 Modulácia QPSK

Priebeh merania je zobrazený na obrázku 8.13. Na ľavom obrázku je priebeh pre vlnovú dĺžku 850 nm a na pravom obrázku pre vlnovú dĺžku 1550 nm.



Obrázok 8.13: Správanie FSO spojenia v prostredí s turbulenciou a bez turbulencie pri modulácii QPSK pre  $\lambda=850$  nm (vľavo) a  $\lambda=1550$  nm (vpravo)

Po vizuálnom posúdení obrázkov je vidieť, že tak ako pri QAM modulácií, aj pri QPSK nastáva výraznejší pokles MER pri použití vlnovej dĺžky 1550 nm. Nasleduje štatistické vyhodnotenie.

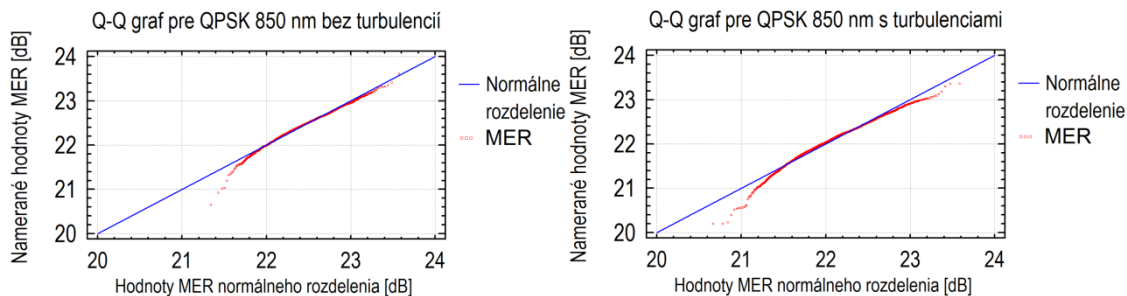
#### Štatistické vyhodnotenie modulácie QPSK

V tabuľke 8.3 sú zobrazené štatistické parametre pre turbulentné aj bezturbulentné prostredie pre vlnové dĺžky 850 nm a 1550 nm.

Tabuľka 8.3: Štatistické parametre

	850 nm		1550 nm	
Parameter	Bez turbulencií	S turbulenciami	Bez turbulencií	S turbulenciami
Počet vzoriek	1821	1821	1845	1845
Priemer	22,46	22,13	22,48	21,05
Medián	22,47	22,17	22,48	21,10
Rozptyl	0,11	0,19	0,12	0,46
Smerodajná odchýlka	0,33	0,43	0,35	0,68
Variačný koeficient [%]	1,47	1,95	1,55	3,23

Zistenie či majú dané priebehy normálne rozdelenie je pre  $\lambda=850$  nm zobrazené na obrázku 8.14 pomocou Q-Q grafov. Podľa priebehov je možné usúdiť, že namerané dáta nepochádzajú z normálneho rozdelenia. Z tohto dôvodu bude na porovnanie prostredí pri danej vlnovej dĺžke pomocou Mann-Whitneyovho testu.



Obrázok 8.14: Q-Q grafy pre 850 nm bez turbulencií (vľavo) a s turbulenciami (vpravo)

### Porovnanie mediánov pomocou Mann-Whitneyovho testu pre $\lambda=850$ nm

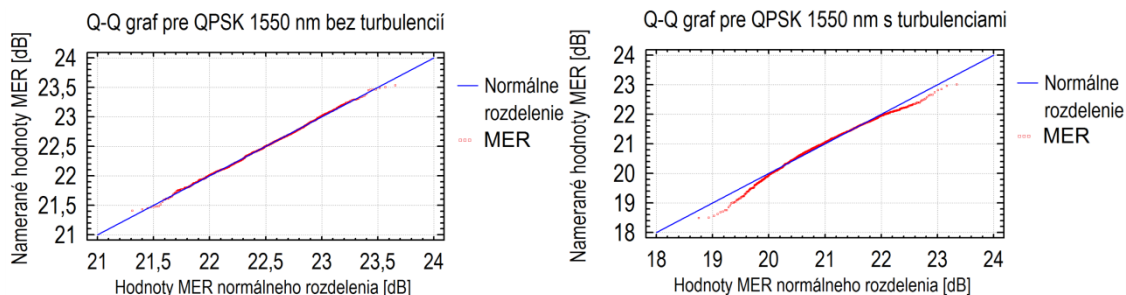
Nulová hypotéza  $H_0$ : mediány daných prostredí sú rovnaké

Alternatívna hypotéza  $H_A$ : mediány daných prostredí nie sú rovnaké

p-hodnota: 0

Rozhodnutie: Na hladine významnosti 0,05 zamietam  $H_0$  (p-hodnota  $\ll 0$ , t-test). Rozdiel medzi mediánmi daných prostredí je štatisticky významný.

Obrázok 8.15 zobrazuje Q-Q grafy pre vlnovú dĺžku 1550 nm a dané prenosové prostredia. Hodnoty namerané v bezturbulentnom prostredí síce pochádzajú z normálneho rozdelenia, ale keďže hodnoty z turbulentného prostredia nepochádzajú z normálneho rozdelenia, bude opäť použitý Mann-Whitneyovho test na zhodu mediánov.



Obrázok 8.15: Q-Q grafy pre 1550 nm bez turbulencií (vľavo) a s turbulenciami (vpravo)

### Porovnanie mediánov pomocou Mann-Whitneyovho testu pre $\lambda=1550$ nm

Nulová hypotéza  $H_0$ : mediány daných prostredí sú rovnaké

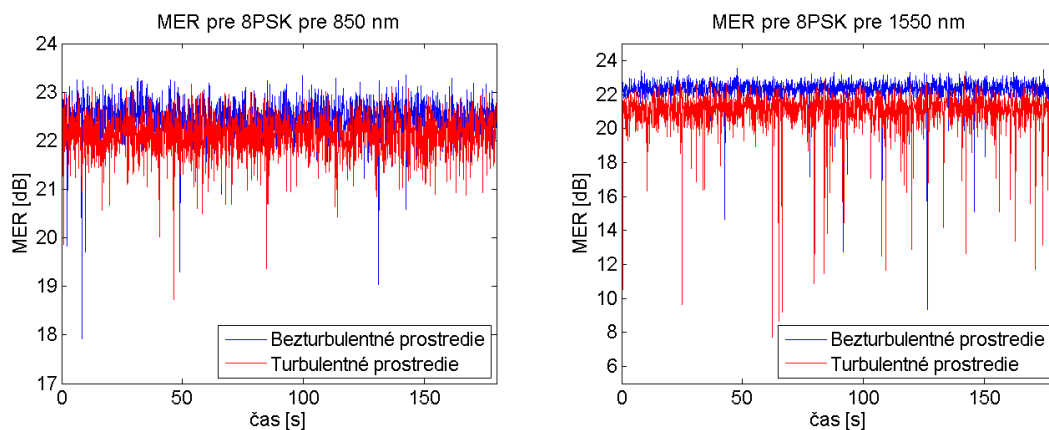
Alternatívna hypotéza  $H_A$ : mediány daných prostredí nie sú rovnaké

p-hodnota: 0

Rozhodnutie: Na hladine významnosti 0,05 zamietam  $H_0$  (p-hodnota  $\ll 0$ , t-test). Rozdiel medzi mediánmi daných prostredí je štatisticky významný.

### 8.2.2.2 Modulácia 8-PSK

Priebeh merania je zobrazený na obrázku 8.16. Na ľavom obrázku je priebeh pre vlnovú dĺžku 850 nm a na pravom obrázku pre vlnovú dĺžku 1550 nm.



Obrázok 8.16: Správanie FSO spojenia v prostredí s turbulenciou a bez turbulencie pri modulácii 8PSK pre  $\lambda=850$  nm (vľavo) a  $\lambda=1550$  nm (vpravo)

Pri poslednej testovanej modulácii sa opäť ukázalo, že FSO spojenie pracujúce na vlnovej dĺžke 1550 nm je citlivejšie na turbulencie ako FSO spojenie pracujúce na vlnovej dĺžke 850 nm.

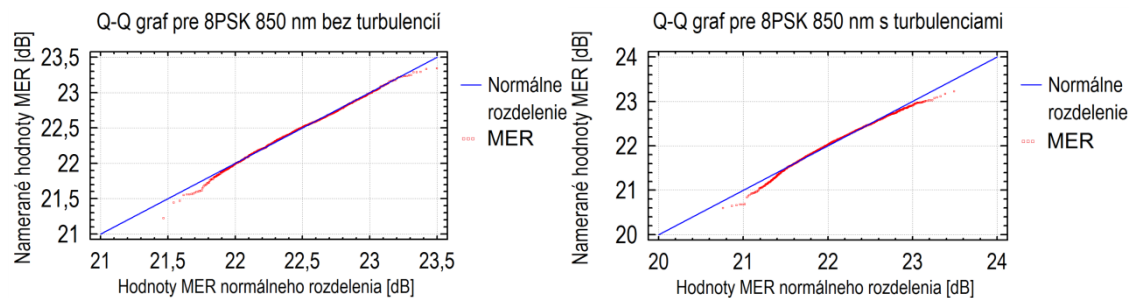
### Štatistické vyhodnotenie modulácie QPSK

V tabuľke 8.4 sú zobrazené štatistické parametre pre turbulentné a bezturbulentné prostredie pre vlnové dĺžky 850 nm a 1550 nm.

Tabuľka 8.4: Štatistické parametre

	850 nm		1550 nm	
Parameter	Bez turbulencií	S turbulenciami	Bez turbulencií	S turbulenciami
Počet vzoriek	1806	1806	1861	1861
Priemer	22,48	22,12	22,31	21,01
Medián	22,49	22,15	22,35	21,22
Rozptyl	0,09	0,16	0,44	1,57
Smerodajná odchýlka	0,30	0,40	0,66	1,25
Variačný koeficient [%]	1,34	1,83	2,99	5,97

Q-Q grafy na zistenie normality pre vlnovú dĺžku 850 nm sú zobrazené na obrázku 8.17. V ľavej časti je Q-Q graf pre bezturbulentné prostredie a v pravej pre turbulentné prostredie. Na pravom Q-Q grafe je poznať, že dáta nepochádzajú z normálneho rozdelenia. Z toho dôvodu, bude vykonaný Mann-Whitneyovho test na zhodu mediánov.



Obrázok 8.17: Q-Q grafy pre 850 nm bez turbulencií (vľavo) a s turbulenciami (vpravo)

#### Porovnanie mediánov pomocou Mann-Whitneyovho testu pre $\lambda=850$ nm

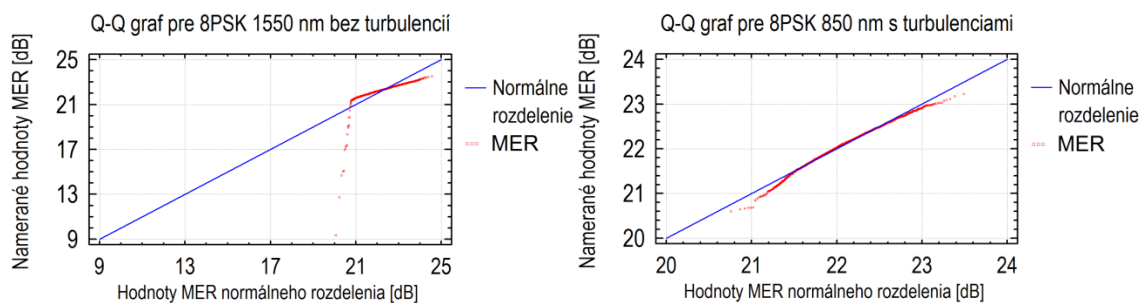
Nulová hypotéza  $H_0$ : mediány daných prostredí sú rovnaké

Alternatívna hypotéza  $H_A$ : mediány daných prostredí nie sú rovnaké

p-hodnota: 0

Rozhodnutie: Na hladine významnosti 0,05 zamietam  $H_0$  (p-hodnota  $\ll 0$ , t-test). Rozdiel medzi mediánmi daných prostredí je štatisticky významný.

N obrázku 8.18 sú zobrazené Q-Q grafy pre vlnovú dĺžku 1550 nm. Vľavo sa nachádza graf pre bezturbulentné prostredie a vpravo pre turbulentné prostredie. Z oboch grafov je vidieť, že dáta nepochádzajú z normálne rozdelenia a preto je použitie Mann-Whitneyovho testu na zhodu mediánov.



Obrázok 8.18: Q-Q grafy pre 1550 nm bez turbulencií (vľavo) a s turbulenciami (vpravo)

#### Porovnanie mediánov pomocou Mann-Whitneyovho testu pre $\lambda=850$ nm

Nulová hypotéza  $H_0$ : mediány daných prostredí sú rovnaké

Alternatívna hypotéza  $H_A$ : mediány daných prostredí nie sú rovnaké

p-hodnota: 0

Rozhodnutie: Na hladine významnosti 0,05 zamietam  $H_0$  (p-hodnota  $\ll 0$ , t-test). Rozdiel medzi mediánmi daných prostredí je štatisticky významný.



### 8.3 Súhrnné porovnanie testovaných modulácií

V tabuľke 8.5 sú uvedené jednotlivé priemery MER s odchýlkami pre každú testovanú moduláciu. Priemery s odchýlkami sú tvorené na intervale spoľahlivosti 95%.

Tabuľka 8.5: Priemery MER pre jednotlivé modulácie

Modulácia	Prostredie	MER [dB]	
		$\lambda = 850 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
4-QAM	Bezturbulentné	$17,82 \pm 0,01$	$17,98 \pm 0,01$
	Turbulentné	$17,72 \pm 0,01$	$16,53 \pm 0,01$
8-QAM	Bezturbulentné	$20,35 \pm 0,01$	$20,35 \pm 0,01$
	Turbulentné	$20,26 \pm 0,01$	$17,99 \pm 0,02$
QPSK	Bezturbulentné	$22,46 \pm 0,02$	$22,48 \pm 0,02$
	Turbulentné	$22,13 \pm 0,02$	$21,05 \pm 0,03$
8-PSK	Bezturbulentné	$22,48 \pm 0,01$	$22,32 \pm 0,03$
	Turbulentné	$22,12 \pm 0,02$	$21,01 \pm 0,06$

Z tabuľky 8.5 je možné vyčítať ako turbulencia vplýva na jednotlivé modulácie pri použití dvoch vlnových dĺžok. Čo sa týka vlnovej dĺžky 850 nm, nie je vplyv turbulencií taký výrazný. Napriek tomu sa podľa štatistiky jedná o štatisticky významné rozdiely. Navyše je vidieť aj väčší rozdiel medzi prostrediami pri PSK moduláciách, ako pri QAM moduláciách. Pri nasadení vlnovej dĺžky 1550 nm sú rozdiely medzi prostrediami oveľa výraznejšie. Ďalším rozdielom oproti vlnovej dĺžke 850 nm je, že turbulencie majú väčší vplyv na modulácie QAM ako na modulácie PSK.

## 9 Testovanie vplyvu hmly na vybrané modulácie

Medzi najväčšie zdroje útlmu v optickom spojení patrí hmla. V závislosti na hustote, môže hmla degradovať signál rádovo od jednotiek decibelov až po desiatky a stovky decibelov. Na simuláciu takejto hmly bol použitý suchý ľad, ktorého sublimácia v horúcej vode vytvárala hustú hmlu veľmi podobnú tej prírodnej.

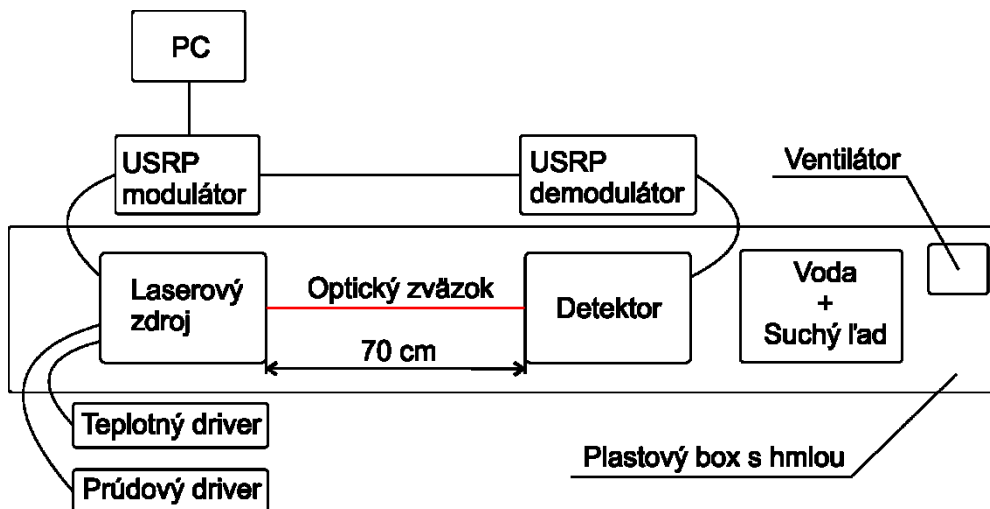
### 9.1 Zapojenie meracieho pracoviska a nastavenie prístrojov

Ako bolo spomenuté, hmla bola v tomto meraní simulovaná pomocou suchého ľadu. Suchý ľad je vlastne pevná forma oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ). Vyrába sa v špeciálnych zariadeniach. Oxid uhličitý najprv expanduje a následne vzniká jemný prášok, sneh  $\text{CO}_2$ . Tento sneh je potom pretlačovaný špeciálnou matricou, dochádza k jeho zlisovaniu, zhutneniu a vytvoreniu suchého ľadu. [39]

#### Fyzikálne vlastnosti suchého ľadu:

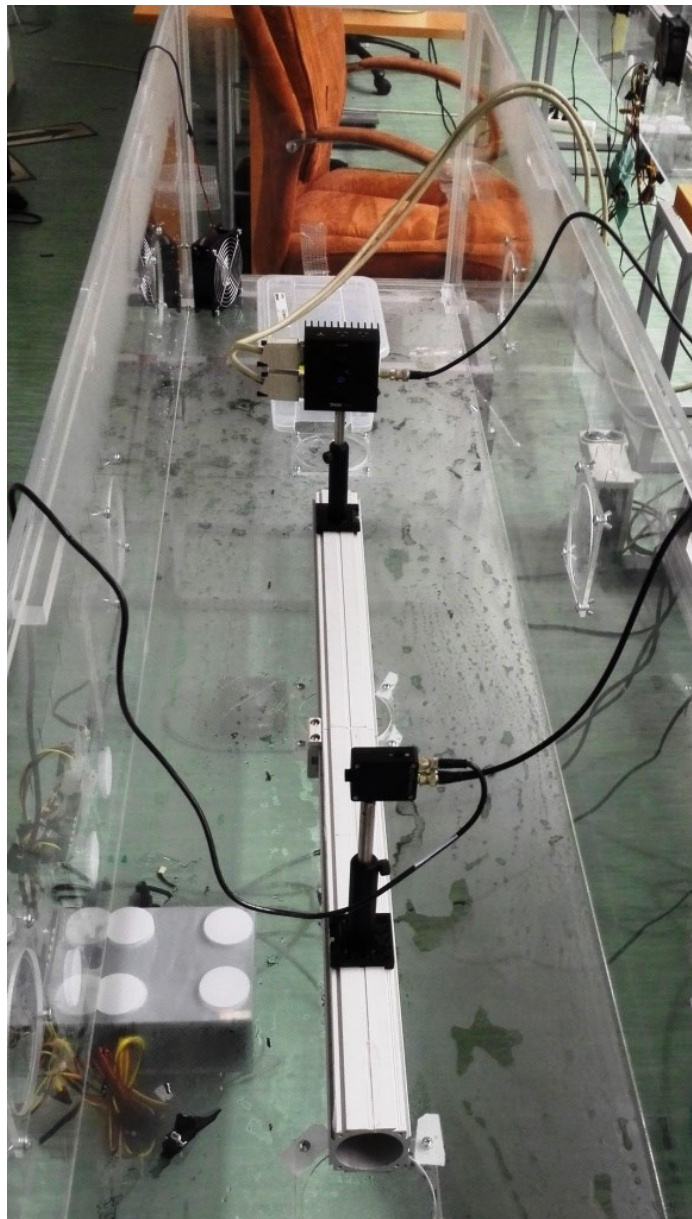
- Teplota:  $-78,8\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Sublimačné teplo:  $640\text{ kJ/kg}$  (z  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- Hustota:  $1,2 - 1,6\text{ kg/dm}^3$
- Bez zápachu a chuti
- Nejedovatý, nezápalný, nedýchatelný
- Limit vo vzduchu:  $0,5\text{ \% obj.}$
- Strata vedomia:  $> 8\text{ \% obj.}$

Blokové schéma meracieho pracoviska je na obrázku 9.1. Je prakticky rovnaké ako pri meraní s turbulenciami, len namiesto toho aby na zväzok pôsobili turbulencie, budú komponenty vytvárajúce optický zväzok vložené do plastového boxu, v ktorom bude vytváraná hmla pomocou vyššie uvedeného suchého ľadu.



Obrázok 9.1: Blokové schéma pracoviska na testovanie vplyvu hmly na modulovaný signál

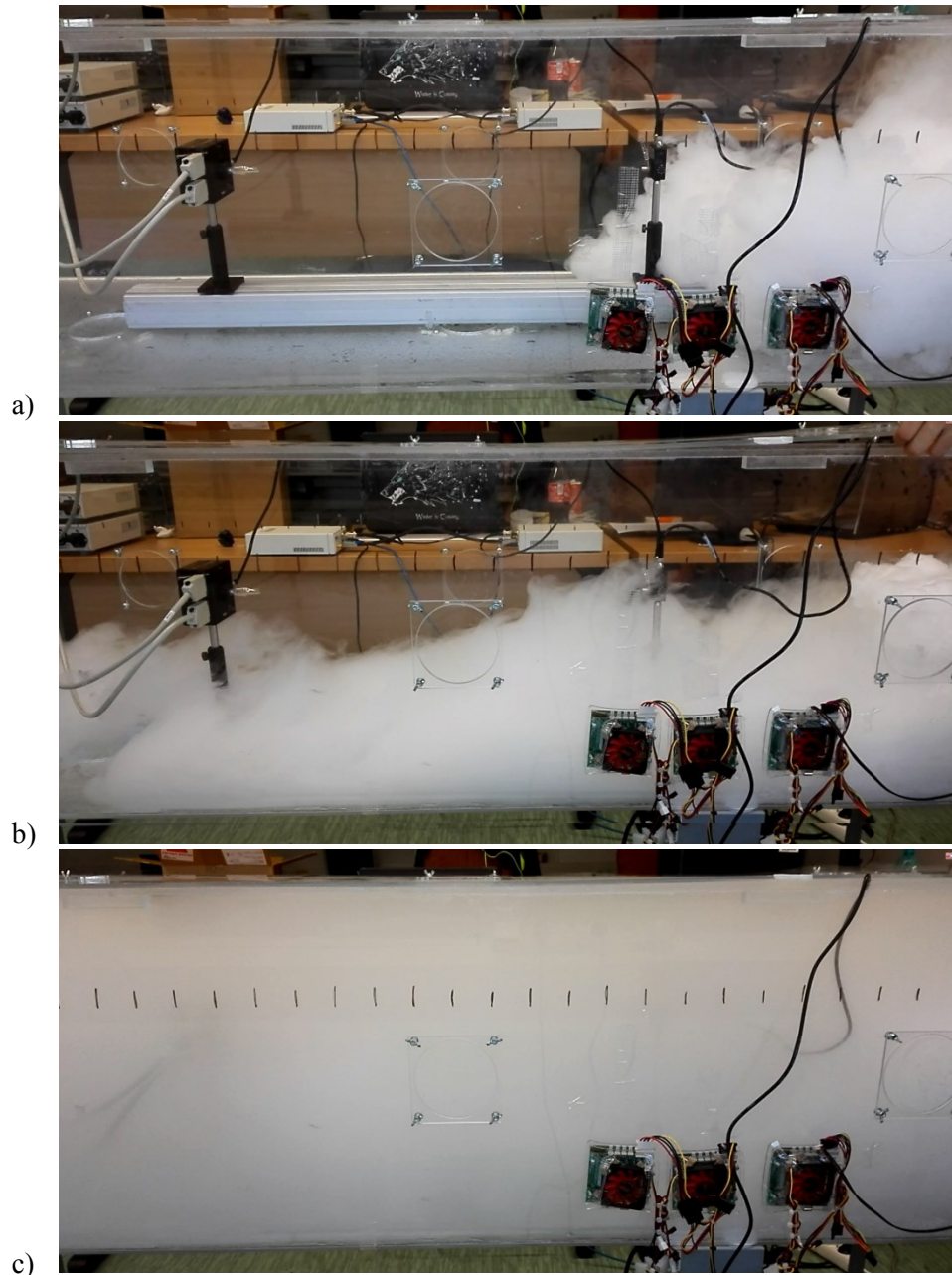
K meraniu boli použité rovnaké Labview aplikácie ako pri meraní s turbulenciami. Všetky nastavenia použité v tomto meraní sú už popísané v kapitole 8.1. Odstránili sa však teplovzdušné ventilátory. Laserový zdroj a detektor sa vložili do plastového boxu. Spolu s nimi sa tam vložila aj nádoba, do ktorej sa vliala voda s teplotou 90 °C o objemu 1,7 l. Do vody sa potom vsypalo vždy rovnaké množstvo suchého ľadu – 110 g. Nastala sublimácia. Vytvorenú hmlu bolo potom potrebné rozfúkať po celom boxe. Na to bol použitý malý ventilátor. Následne bola zaznamenaná doba nadväzovania spojenia. Na obrázku 9.2 je zobrazené reálne zapojenie meracieho pracoviska. Výsledky sú vyhodnotené v nasledujúcich kapitolách.



*Obrázok 9.2: Zapojenie meracieho pracoviska na testovanie vplyvu hmly na modulovaný signál*

## 9.2 Výsledky testovania vplyvu hmly na modulovaný signál

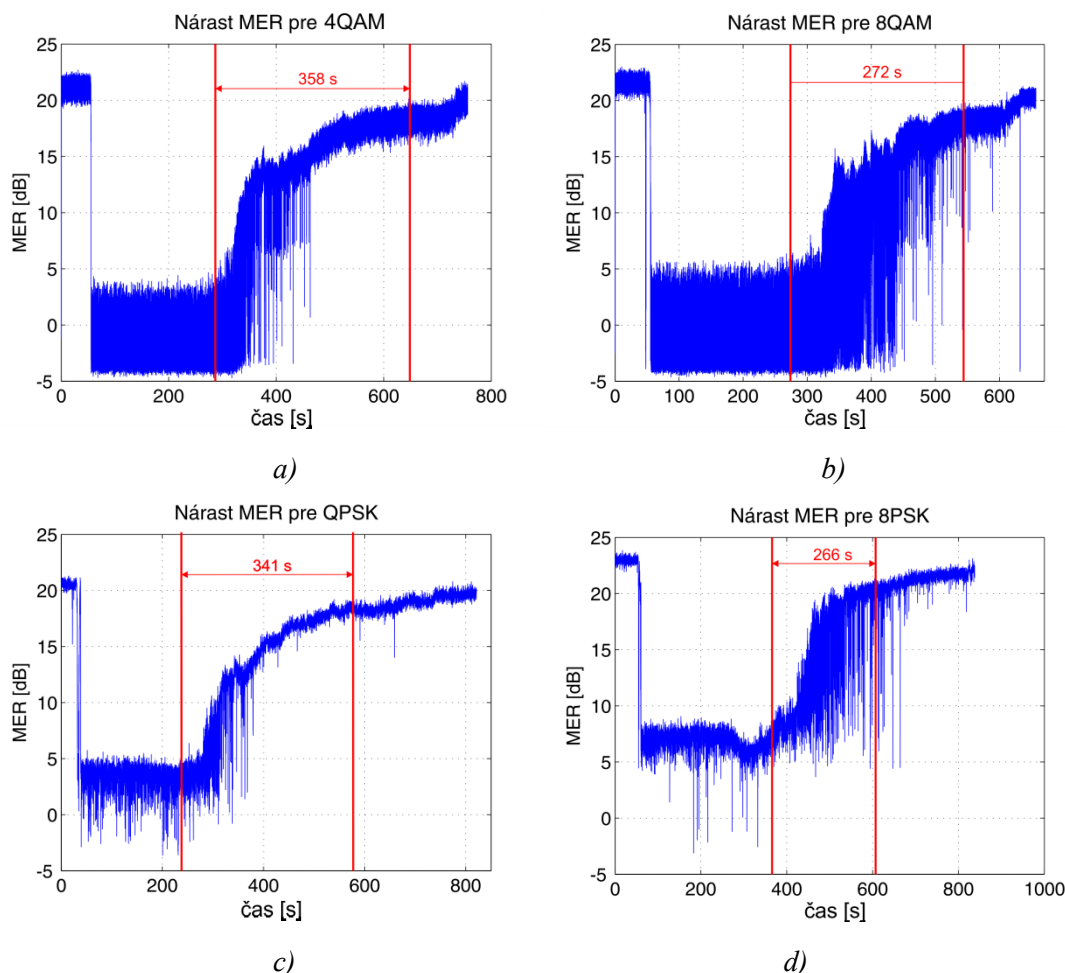
Na obrázku 9.3 je v troch krokoch zobrazené plnenie plastového boxu hmlou. Najprv sa do nádoby s vodou nasype ľad (a). Potom sa nechá hmla roziahnuť po celom dne (b) a nakoniec sa rozfúka ventilátorom do celého boxu (c).



Obrázok 9.3: Postupné plnenie plastového boxu hmlou

Testované modulácie boli 4-QAM, 8-QAM, QPSK a 8-PSK. Z každého merania boli zaznamenané hodnoty MER, ktoré boli potom vynesené do grafu. Všetky merania boli urobená

na vlnovej dĺžke 1550 nm. Príklad takéhoto grafu pre každú moduláciu je zobrazený na obrázku 9.4.



Obrázok 9.4: Nárust hodnoty MER pri postupnom rozpadávaní sa hmly pre a) 4-QAM, b) 8-QAM, c) QPSK, d) 8PSK

Obrázok 9.4 znázorňuje nábehovú dobu pre dané modulácie. Nábehová doba je ohraničená červenými čiarami, medzi ktorými je napísaný aj čas nadväzovania pre daný graf. Za povšimnutie stojí, že čiara ukončujúca nadväzovanie nie je v mieste najvyššieho MER. Keďže meranie prebiehalo v uzavretom boxe viac ako 10 minút, po rozpade hmly sa z horúcej vody naďalej uvoľňovala para. Táto para pôsobila na samotný optický zväzok, čím degradovala prijatý výkon. Ďalšia degradácia nastala z dôvodu zarosenia kolimátoru umiestneného na držiaku LD. Preto keď začala hodnota MER oscilovať okolo jednej hodnoty, bol kryt z boxu odstránený. Tým došlo k odstráneniu pary a zarosenia, čo spôsobilo nárast hodnoty MER, ako je zobrazené na každom grafe na konci merania. Pre každú moduláciu bolo urobených niekoľko meraní, ktorých jednotlivé výsledky sú v tabuľke 9.1.

Tabuľka 9.1: Časové údaje z meraní vplyvu hmly na modulovaný signál

Čas [s]	Číslo merania	Modulácia											
		4-QAM			8-QAM			QPSK			8-PSK		
		Z	K	R	Z	K	R	Z	K	R	Z	K	R
	1	171	318	147	202	410	208	301	707	406	217	449	232
	2	274	602	328	261	505	244	286	727	441	302	570	268
	3	243	572	329	271	543	272	282	660	378	293	520	227
	4	289	647	358	258	497	239	386	613	257	336	602	266
	5	271	601	330	275	581	306	235	576	341	325	605	280

V tabuľke 9.1 je začiatok nadväzovania spojenia označený ako „Z“, koniec ako „K“ a rozdiel medzi týmito dvoma hodnotami ako „R“. U 4-QAM modulácie pri meraní č. 1 došlo k chybe z dôvodu zlého nasadenia krytu boxu. Z tohto dôvodu sa hmla rýchlejšie rozpadla a vzniklo tak odľahlé pozorovanie pre štatistiku. Preto toto meranie nebude brané do úvahy pri štatistickom vyhodnotení.

Základné hodnoty štatistického vyhodnotenia sú zobrazené v tabuľke 9.2. Už z hodnôt jednotlivých priemerov je vidieť rozdiely medzi moduláciami, ktoré nemajú rovnaký počet stavov.

Tabuľka 9.2: Hodnoty štatistického vyhodnotenia pre jednotlivé modulácie

Modulácia	Priemer	Medián	Rozptyl	Smerodajná odchýlka	Variačný koeficient [%]
4-QAM	336	329	211	14	4
8-QAM	253	244	1367	37	15
QPSK	364	378	4966	70	19
8-PSK	254	266	557	24	9

Ďalšia časť obsahuje test na normalitu dát. Ak je normalita splnená použije sa ANOVA, v opačnom prípade sa využije Kruskal-Wallisov test. Na testovanie normality je použitý Shapiro-Wilkov test. V tabuľke 9.3 je pre každú moduláciu uvedená p-hodnota, podľa ktorej sa určí normalita dát.

#### Shapiro-Wilkov test na normalitu dát

Nulová hypotéza  $H_0$ : dáta pochádzajú z normálneho rozdelenia

Alternatívna hypotéza  $H_A$ : dáta nepochádzajú z normálneho rozdelenia



Tabuľka 9.3: Rozhodnutie o normalite dát daných modulácií

Modulácia	p-hodnota	Rozhodnutie
4-QAM	0,009	Na hladine významnosti 0,05 zamietam $H_0$ (p-hodnota < 0,05).
8-QAM	0,906	Na hladine významnosti 0,05 nezamietam $H_0$ (p-hodnota $\geq$ 0,05).
QPSK	0,96	Na hladine významnosti 0,05 nezamietam $H_0$ (p-hodnota $\geq$ 0,05).
8-PSK	0,25	Na hladine významnosti 0,05 nezamietam $H_0$ (p-hodnota $\geq$ 0,05).

Keďže sa pri modulácii 4-QAM zamietla normalita dát, nasleduje Kruskal-Wallisov test na porovnanie mediánov.

#### Kruskal-Wallisov test na porovnanie mediánov

Nulová hypotéza  $H_0$ : mediány všetkých modulácií sú rovnaké

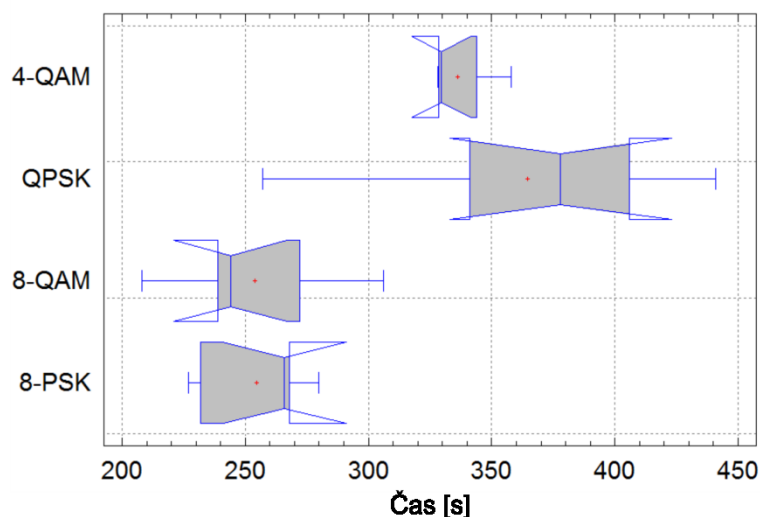
Alternatívna hypotéza  $H_A$ : medzi mediánmi je štatisticky významný rozdiel

p-hodnota: 0,013

Rozhodnutie: Na hladine významnosti 0,05 zamietam  $H_0$  (p-hodnota < 0,05). Medzi mediánmi existuje štatisticky významný rozdiel.

Keďže Kruskal-Wallisov test odhalil štatisticky významný rozdiel medzi mediánmi, je potrebné zistiť ktoré mediány a teda ktoré modulácie sa od seba štatisticky významne líšia. Na toto posúdenie je využitý krabicový graf so zárezmi, ktorý je zobrazený na obrázku 9.5.

Krubicový graf so zárezmi



Obrázok 9.5: Krubicový graf so zárezmi pre dané modulácie

Štatisticky významný rozdiel medzi mediánmi na hladine významnosti 0,05 nastáva vtedy, keď sa zárezy jednotlivých krabicových boxov neprekrývajú. Z obrázku 9.4 je vidieť, že

medzi moduláciami 4-QAM a QPSK nie je štatisticky významný rozdiel, pretože sa zárezy na krabicových boxoch prekrývajú. To isté platí medzi moduláciami 8-QAM a 8-PSK. To znamená že zo štatistického hľadiska sa líšia len tie modulácie, ktoré majú rozdielny počet stavov.



## 10 Simulovanie vplyvu atmosférických podmienok na modulovaný optický zväzok

Optisystem je obsiahly návrhový softvér vyvinutý spoločnosťou Optiwave, ktorý umožňuje užívateľovi navrhovať, testovať a simulovať optické spojenia v prenosovej vrstve moderných optických sieťach. [40] Na všetky simulácie bola využitá verzia 13 tohto softvéru.

Atmosférické vplyvy sa v softvéri Optisystem dali simulovať pomocou dvoch parametrov. Prvým bol útlm, ktorého veľkosť určovala napríklad hustotu hmly, silu dažďa alebo sneženia. Druhým bol štrukturálny parameter indexu lomu. Týmto parametrom sa dal nastaviť sila turbulencií pôsobiacich na bezvláknové optické spojenie.

Pre túto simuláciu boli vybrané tri druhy modulácií: OOK, 4-QAM a QPSK. 4-QAM a QPSK jednak preto, že boli použité aj v praktickom meraní a taktiež aj preto, že sa dostávajú do popredia hlavne vo vláknovej optike. Preto je zámerom tejto práce testovať ich chovanie v turbulentnom prostredí. OOK modulácia patrí zasa k veľmi často využívaným moduláciám a taktiež slúži ako základ pre porovnanie ostatných modulácií. Každá simulácia bola opakovaná 10 krát, a z výsledkov boli urobené priemery, s ktoré boli potom spracované. V tabuľke 10.1 sú vypísané parametre použité pri simulácii.

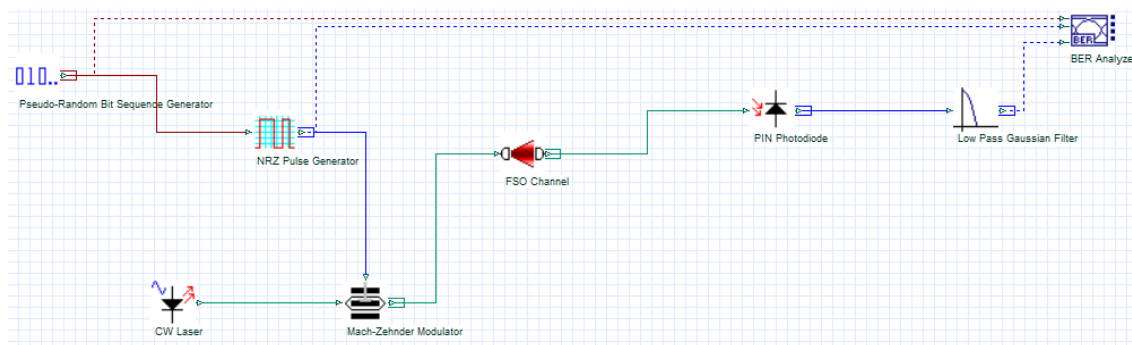
Tabuľka 10.1: Parametre simulácie pre jednotlivé modulácie

Prenosová rýchlosť [Mbit.s <sup>-1</sup> ]	155	1250	
Útlm [dB/km]	0,47	4,4	28,9
Štrukturálny parameter indexu lomu [m <sup>-2/3</sup> ]	10 <sup>-17</sup>	10 <sup>-12</sup>	
Výkon laseru [mW]	100		
Vlnová dĺžka [nm]	850	1550	
Rozbiehavosť lúča [mrad]	2		
Priemer apertúry vysielača [cm]	5		
Priemer apertúry prijímača [cm]	20		

### 10.1 Testovanie modulácie OOK

Táto modulácia je veľmi jednoduchá. Je to typ intenzitnej modulácie, ktorá informačné bity zakóduje do dvoch výkonových úrovní. Podrobnejší popis je uvedený v kapitole 6.1. V rámci tejto simulácie budú použité spolu s OOK aj linkové kódy NRZ a RZ s 50% a 33% návratom k nule.

Na obrázku 10.1 je zobrazená schéma zapojenia zo softvéru Optisystem použitá na simuláciu pre moduláciu OOK.



Obrázok 10.1: Schéma zapojenia pre moduláciu OOK v softvéri Optisystem

Sekvencia bitov je generovaná pomocou pseudonáhodného generátora, na ktorý je pripojený Generátor NRZ impulzov. Tento generátor vytvára elektrické impulzy, ktorý sú potom modulované na optický signál pomocou Mach-Zhenderovho modulátora. Následne je optický signál prenesený cez FSO kanál. V tomto komponente sú menené kľúčové parametre simulujúce atmosférické podmienky. Optisystem v tomto komponente využíva Gamma-Gamma model. Po prejdenní FSO kanálom je signál detegovaný fotodetektorom typu PIN, ktorý má nastavené vlastnosti ako InGaAs. Fotodetektor premieňa optický signál na elektrický, ktorý je následne filtrovaný pomocou Gausovského filteru typu dolná prepust'. Na vyhodnotenie slúži BER analyzátor, ktorý poskytuje diagram oka, Q-faktor a BER.

Pre linkový kód RZ bola použitá rovnaká schéma s tým rozdielom, že namiesto Generátora NRZ impulzov sa použil Generátor RZ impulzov, v ktorom sa nastavila perióda návratu k nule na 50% a potom na 33%.

#### 10.1.1 Výsledky simulácií OOK modulácie na vlnovej dĺžke 1550 nm

V nasledujúcej časti sa nachádzajú grafy popisujúce správanie modulovaného optického zväzku pod vplyvom rôznych stupňov turbulencie. Simulácie obsahujú hodnoty BER závislé na vzdialenosti, prenosovej rýchlosti a útlmu. Ako bolo spomenuté vyššie, pomocou útlmu je simulovaná viditeľnosť, čiže podmienky ako hmla, dážď, opar a podobne.

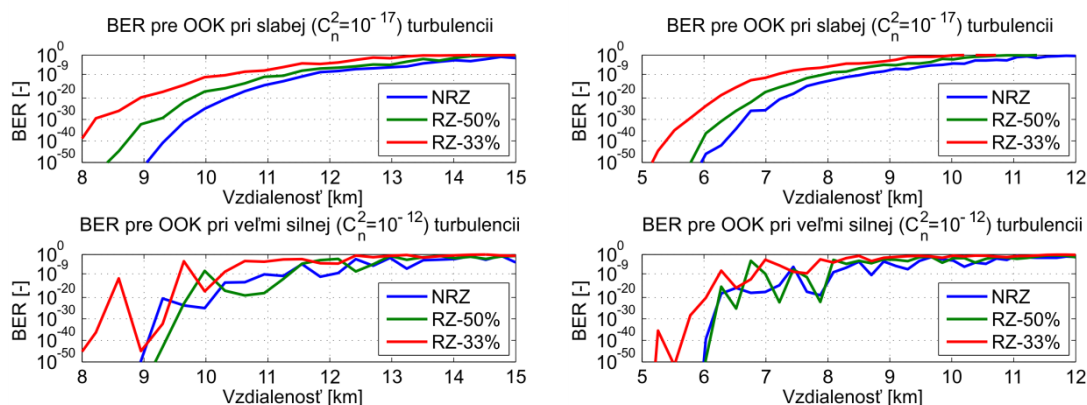
##### Útlm prostredia 0,47 dB/km

Na obrázku 10.2 je zobrazená BER spojenia, pre dve prenosové rýchlosti,  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo). Útlm prostredia bol nastavený na hodnotu 0,47 dB/km, čo je podľa tabuľky 2.1 veľmi jasné prostredie s viditeľnosťou okolo 23 km. V hornej časti obrázku sú vykreslené grafy pre prostredie so slabou turbulenciou simulovanou nastavením štruktúrneho parametru indexu lomu na  $10^{-17}$ . V dolnej časti sú zasa grafy pre prostredie so silnou turbulenciou simulovanou nastavením štruktúrneho parametru indexu lomu na  $10^{-12}$ .

Bez ohľadu na použitý linkový kód sú na grafoch vidieť dva faktory, ktoré ovplyvňujú kvalitu a dosah spojenia. Prvým z nich je použitá prenosová rýchlosť. Vychádzajúc z toho, že pre telekomunikačné spojenia je maximálna hodnota BER  $10^{-9}$ , je rozdiel medzi dosahom pri použití spomenutých dvoch rýchlostí až 3,5 km. Dôvodom tohto rozdielu je to, že pri zvýšení prenosovej rýchlosti dochádza k zníženiu periódy jedného bitu a vplyvom rôznych útlmov

a turbulencií dochádza k degradácii signálu, čoho konečným dôsledkom môže byť nesprávne rozhodnutie na prijímači a teda nárast hodnoty BER.

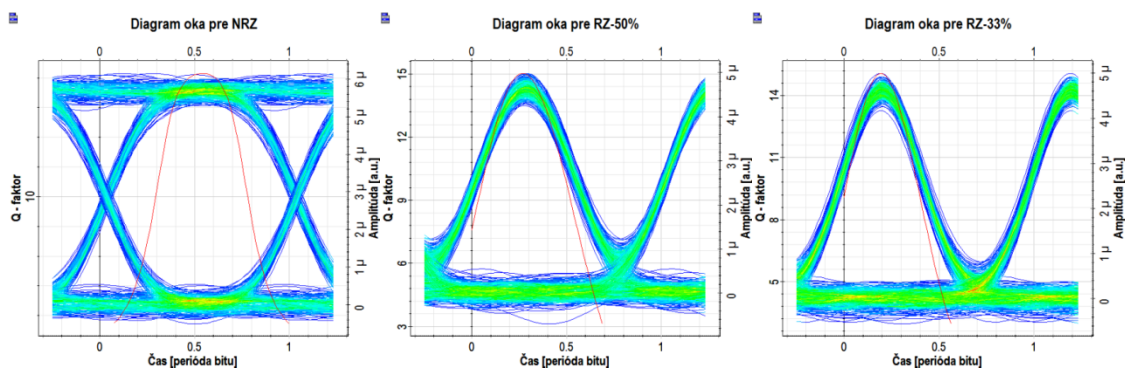
Druhým faktorom je turbulencia. Vplyv tohto javu je veľmi dobre vidieť hlavne na grafoch so silnou turbulenciou v spodnej časti obrázku. Hodnoty BER sú veľmi rozptýlené oproti prostrediu so slabou turbulenciou, čo má za následok ďalšie zmenšenie dosahu spojenia. Taktiež je vidieť, že s rastúcou vzdialenosťou sa rozptýl hodnôt BER znižuje, pretože klesá výkonová úroveň signálu.



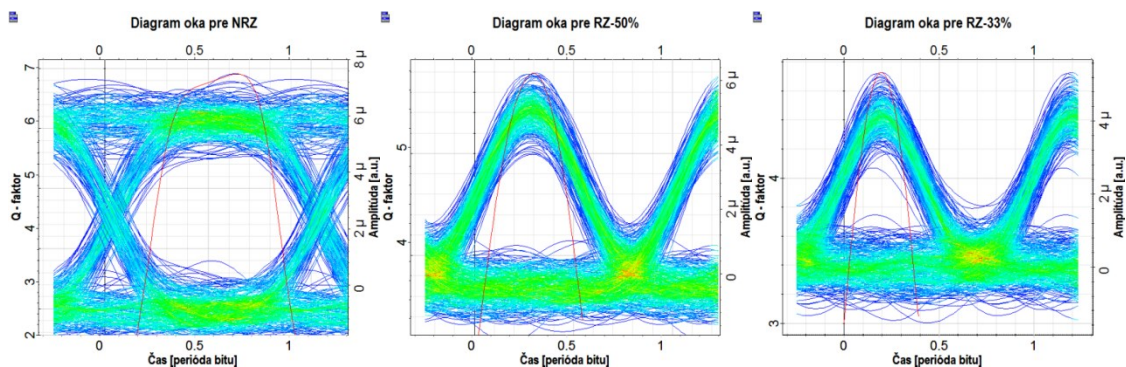
Obrázok 10.2: Hodnoty BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmom  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

Z hľadiska použitého linkového kódu je na tom najlepšie NRZ linkový kód. S týmto linkovým kódom má spojenie najväčší dosah. Potom nasleduje RZ 50% linkový kód a najhoršie je na tom RZ 33%. Hlavným dôvodom je že NRZ využíva pre prenos „1“ bitu celú bitovú periódu a preto má pri tomto linkovom kóde prijímač najviac času na rozhodnutie či je bit „1“ alebo „0“.

Ako ďalšie porovnanie môže poslúžiť aj porovnanie diagramov oka rôznych linkových kódov vo vzdialenosti 8 km od vysielateľa. Pre prenosovú rýchlosť  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  sú tieto diagramy zobrazené na obrázku 10.3 a pre prenosovú rýchlosť  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  na obrázku 10.4.



Obrázok 10.3: Diagramy oka pre moduláciu OOK s linkovými kódmi NRZ, RZ-50% a RZ-33% pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

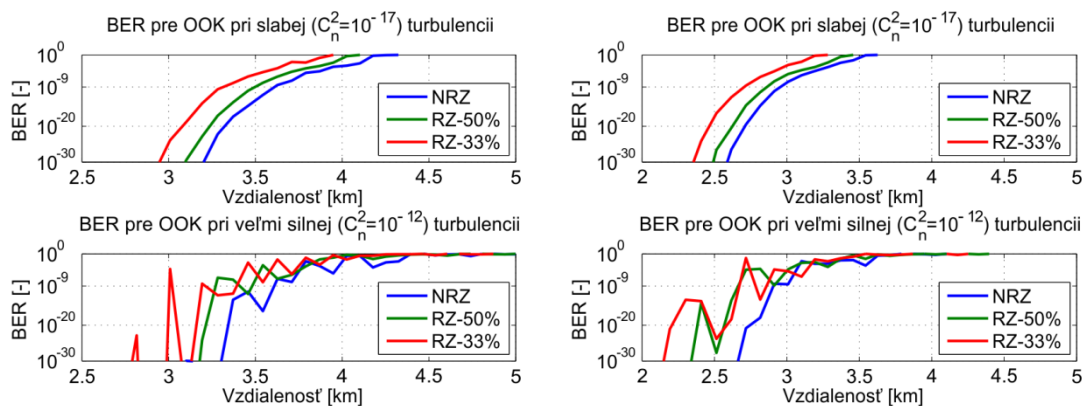


Obrázok 10.4: Diagramy oka pre moduláciu OOK s linkovými kódmi NRZ, RZ-50% a RZ-33% pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Na diagramoch sa dá rozoznať zmenšenie času, po ktorom sa amplitúda vráti k nule. Ďalej na ľavej ypsilonovej ose je zobrazený Q-faktor, podľa ktorého možno vidieť pokles kvality signálu so znižujúcou sa dobou návratu k nule. Zhoršenie dôsledkom vyššej prenosovej rýchlosti je možné vidieť aj porovnaním veľkosti otvorenia oka. Na obrázku 10.3 sú diagramy oka viac otvorené ako na obrázku 10.4, čo značí aj vyššiu kvalitu FSO spojenia.

#### Útlm prostredia $4,4 \text{ dB/km}$

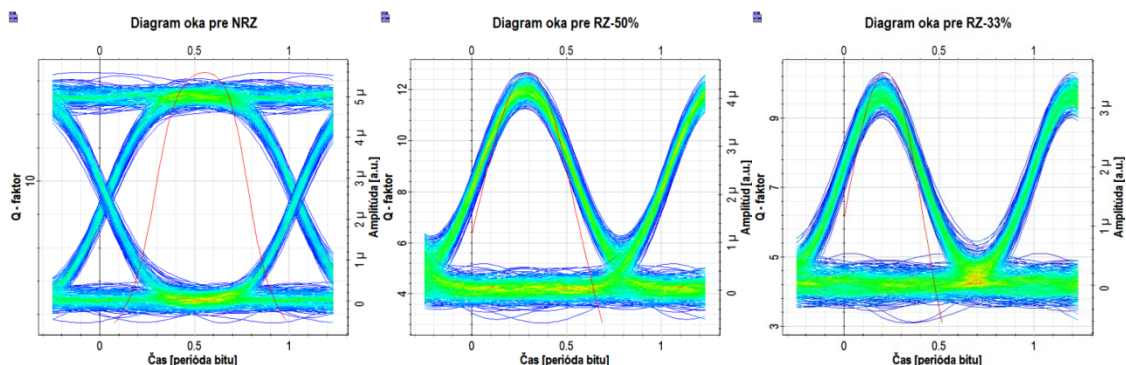
Opäť boli testované dve prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  spolu s dvoma úrovňami sily turbulencie  $C_n^2 = 10^{-17}$  a  $C_n^2 = 10^{-12}$ . Simulácia prebiehala rovnako ako pri útlme  $0,47 \text{ dB/km}$ . Útlm  $4,4 \text{ dB/km}$  značí podľa tabuľky 2.1 ľahký opar alebo stredne silný dážď s viditeľnosťou okolo  $2,8 \text{ km}$ . Na obrázku 10.5 sú pomocou grafov zobrazené hodnoty BER pre jednotlivé simulácie.



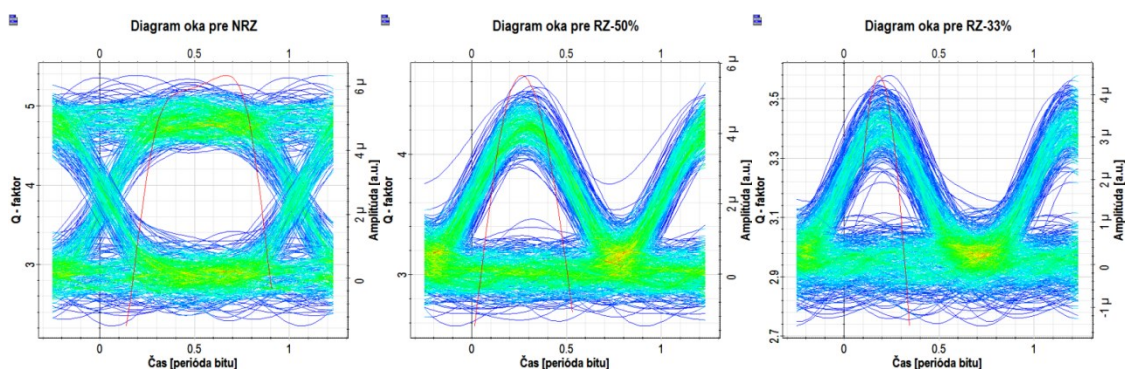
Obrázok 10.5: Hodnoty BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmom  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Podľa predpokladu, zvýšenie útlm spôsobilo výrazné zníženie dosahu FSO spojenia. Taktiež nastalo aj zníženie dosahu v dôsledku zvýšenia prenosovej rýchlosti, pričom tento krát je to zníženie o približne  $700 \text{ m}$ . Vplyv turbulencie je opäť výrazný pri oboch prenosových rýchlostiach, čo spôsobuje nestálosť kvality spojenia.

Na obrázkoch 10.7, resp. 10.8, sú zobrazené diagramy oka pre prenosovú rýchlosť  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ , resp.  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ . Opäť je vidieť výrazný rozdiel v otvorení oka pri všetkých variantoch linkových kódov. Zároveň sa opäť javí najlepším variantom linkový kód NRZ, potom RZ-50% a nakoniec RZ-33%. Diagramy oka sú vykreslené na vzdialenosti 3 km od vysielača.



Obrázok 10.6: Diagramy oka pre moduláciu OOK s linkovými kódmi NRZ, RZ-50% a RZ-33% pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

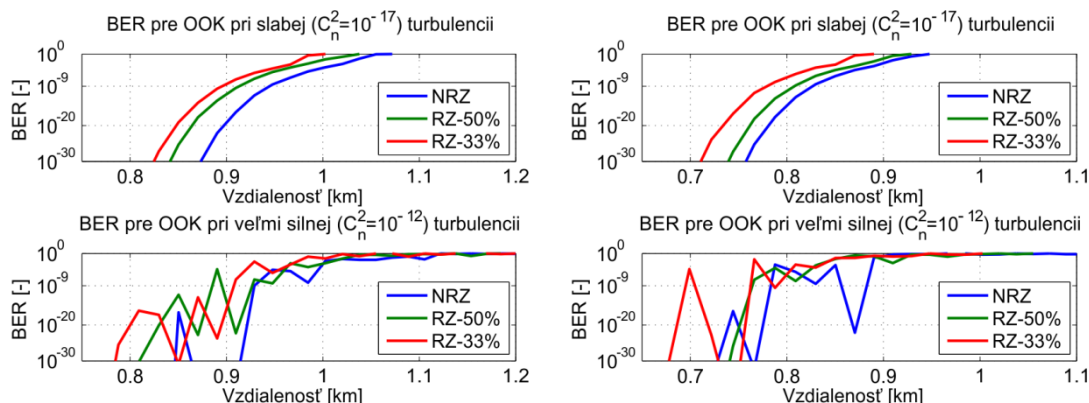


Obrázok 10.7: Diagramy oka pre moduláciu OOK s linkovými kódmi NRZ, RZ-50% a RZ-33% pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

### Útlm prostredia $28,9 \text{ dB/km}$

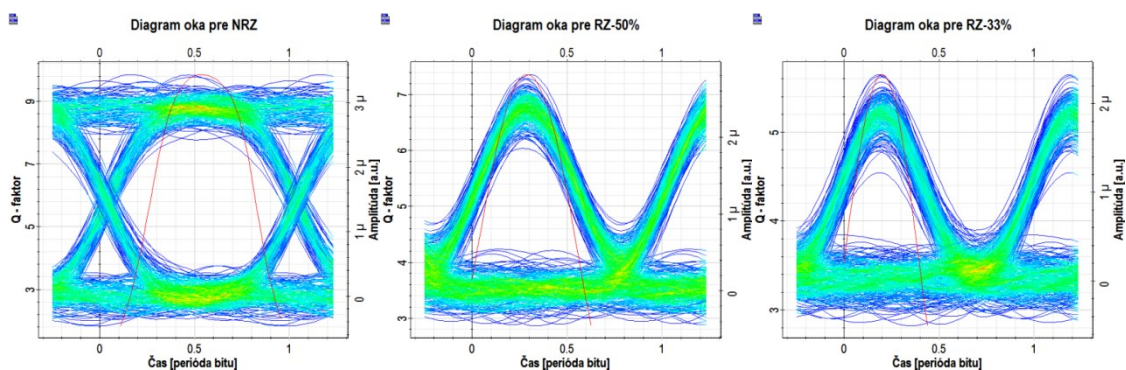
Posledným útlmom s ktorým boli robené simulácie je útlm  $28,9 \text{ dB/km}$ . Tento útlm odpovedá podľa tabuľky 2.1 stredne hustej hmle s viditeľnosťou okolo  $500 \text{ m}$ . Na obrázku 10.8 sú zobrazené grafy obsahujúce hodnoty BER pre tento útlm. Vľavo sa nachádzajú grafy pre prenosovú rýchlosť  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  a na pravej strane sú grafy pre prenosovú rýchlosť  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ . Rovnako ako predtým, aj teraz boli použité dve úrovne sily turbulencie,  $C_n^2 = 10^{-17}$  v hornej časti obrázka a  $C_n^2 = 10^{-12}$  v spodnej časti.



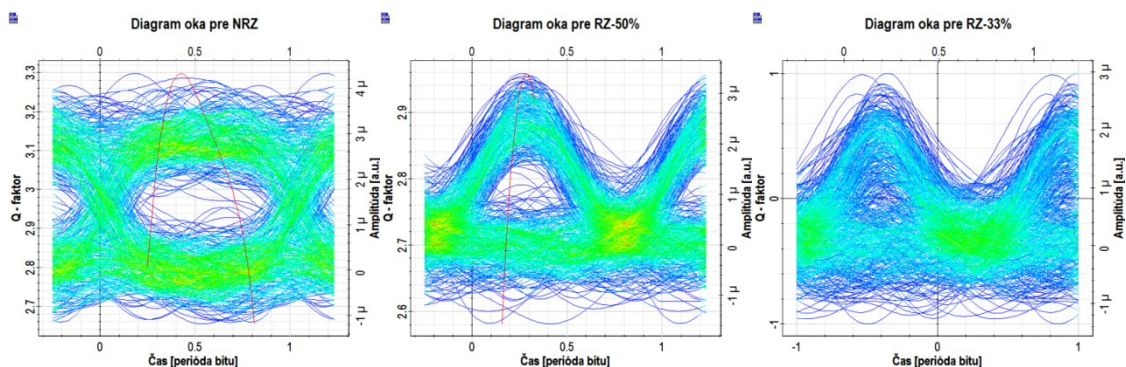


Obrázok 10.8: Hodnoty BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmou  $28,9 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

Obrázok 10.8 zobrazuje ďalšie zníženie dosahu FSO spojenia, keď sa jeho hodnota dostala už pod 1 km. Taktiež je vidieť aj výrazný vplyv turbulencií na kvalitu FSO spojenia, keďže sa v grafe nachádzajú výrazné nelinearity v oblasti hodnôt BER. Podobne ako v predošlých dvoch prípadoch aj teraz sa ukazuje byť najlepšou voľbou linkový kód NRZ. Nakoniec sú ešte na obrázkoch 10.9 a 10.10 zobrazené diagramy oka pre daný útlm a prenosové rýchlosti vo vzdialenosti 900 m od vysieláča.



Obrázok 10.9: Diagramy oka pre moduláciu OOK s linkovými kódmi NRZ, RZ-50% a RZ-33% pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $28,9 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$



Obrázok 10.10: Diagramy oka pre moduláciu OOK s linkovými kódmi NRZ, RZ-50% a RZ-33% pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $28,9 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

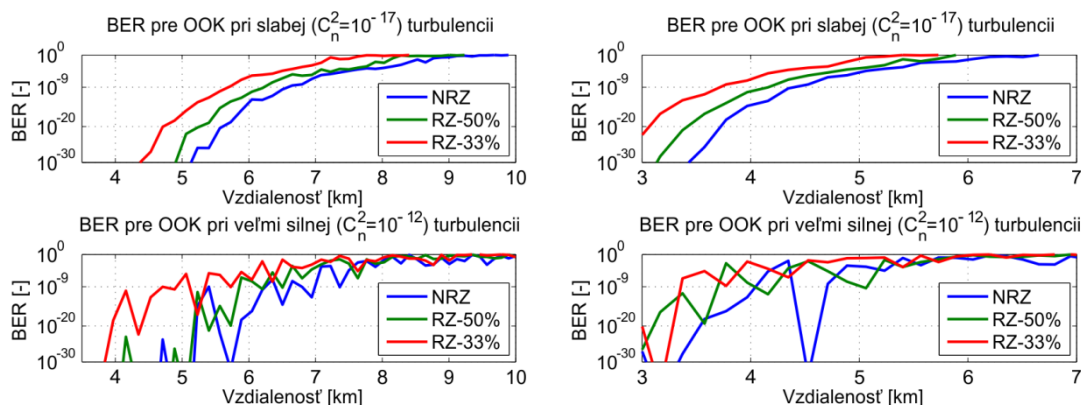
V poslednej variácii pre diagramy oka, je dobre vidieť rozdiel medzi kvalitou spojenia pri použití prenosových rýchlostí  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ . Pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  je pri všetkých typoch linkových kódov zachová hranica BER  $10^{-9}$ , na rozdiel od spojenia s prenosovou rýchlosťou  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ , kde už nedosahuje požadovanú hranicu ani jeden typ linkového kódovania.

### 10.1.2 Výsledky simulácií OOK modulácie na vlnovej dĺžke 850 nm

Pre moduláciu OOK boli urobené aj ďalšie simulácie, tento krát s použitím vlnovej dĺžky 850 nm. Všetky ostatné nastavenia, ktoré boli použité pri simuláciách s vlnovou dĺžkou 1550 nm ostali nezmenené. Prvou simuláciou je simulácia s útlmom atmosféry nastaveným na  $0,47 \text{ dB/km}$ .

#### Útlm prostredia $0,47 \text{ dB/km}$

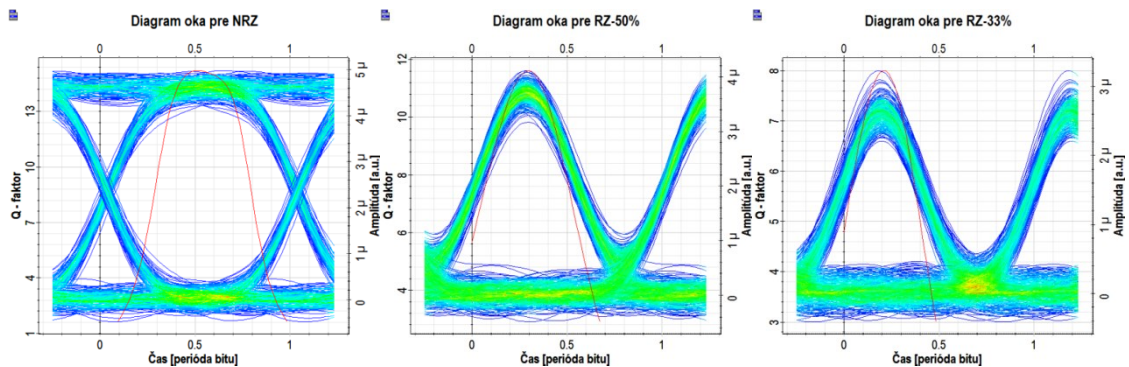
Na obrázku Obrázok 10.11 sú zobrazené hodnoty BER v závislosti na vzdialenosti pre vlnovú dĺžku 850 nm. Ak porovnáme priebehy uvedené na obrázku 10.11 s priebehmi uvedenými na obrázku 10.2, ktorý zobrazuje to isté len pre vlnovú dĺžku 1550 nm, môžeme ľahko rozoznať veľký rozdiel čo sa týka dosahu FSO spojenia. Tento pokles je zapríčinený rozdielnou priepustnosťou atmosféry pre uvedené vlnové dĺžky. Graf priepustnosti atmosféry je k nahliadnutiu na obrázku 2.1. Z uvedeného grafu môžeme zistiť, že priepustnosť atmosféry je pre vlnovú dĺžku 850 nm takmer o 20 % menšia ako pre vlnovú dĺžku 1550 nm.



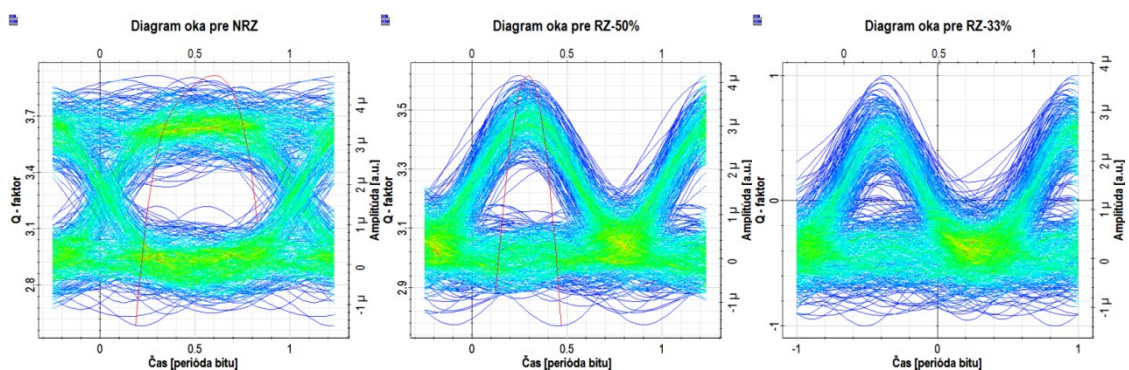
Obrázok 10.11: Hodnoty BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmom  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda = 850 \text{ nm}$

Čo sa týka zníženia dosahu v závislosti na prenosovej rýchlosti alebo sile turbulencií, tak je vidieť, že v tomto smere sú si výsledky simulácie veľmi podobné. V oboch prípadoch došlo k zníženiu dosahu približne o 3 km pri použití prenosovej rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  oproti rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ .

Tak ako pri simuláciách s vlnovou dĺžkou 1550 nm, aj teraz sú na obrázkoch 10.12 a 10.13 znázornené diagramy oka. Na veľkosti otvorenia oka vidieť rozdiel kvality FSO spojenia v závislosti na použitej vlnovej dĺžke, pričom vzdialenosť od vysielacza je nastavená na 5 km.



Obrázok 10.12: Diagramy oka pre moduláciu OOK s linkovými kódmi NRZ, RZ-50% a RZ-33% pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$



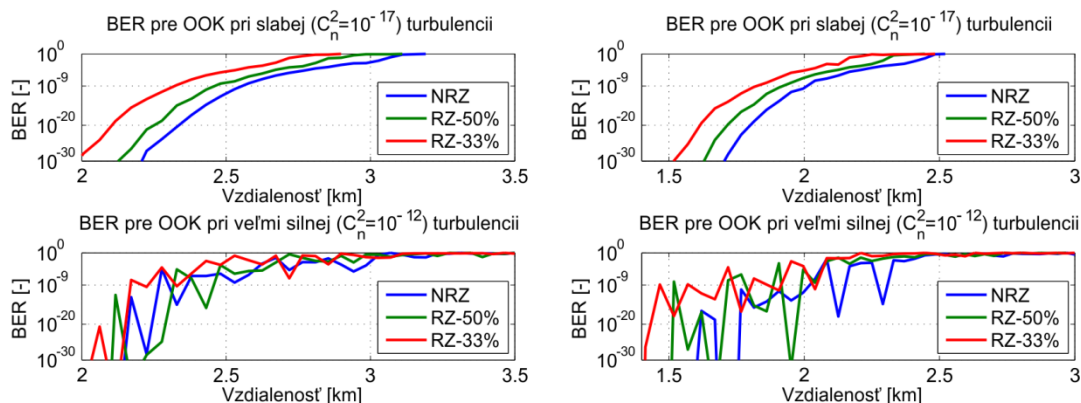
Obrázok 10.13: Diagramy oka pre moduláciu OOK s linkovými kódmi NRZ, RZ-50% a RZ-33% pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

Z vyššie uvedených diagramov oka je vidieť aký veľký vplyv má zvýšenie prenosovej rýchlosti na kvalitu spojenia. Ak tieto diagramy porovnáme s diagramami pre vlnovú dĺžku  $1550 \text{ nm}$ , môžeme vidieť, že pri vlnovej dĺžke  $850 \text{ nm}$  je zhoršenie oveľa markantnejšie.

#### Útlm prostredia $4,4 \text{ dB/km}$

Na obrázku 10.14 sú znázornené hodnoty BER pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo).

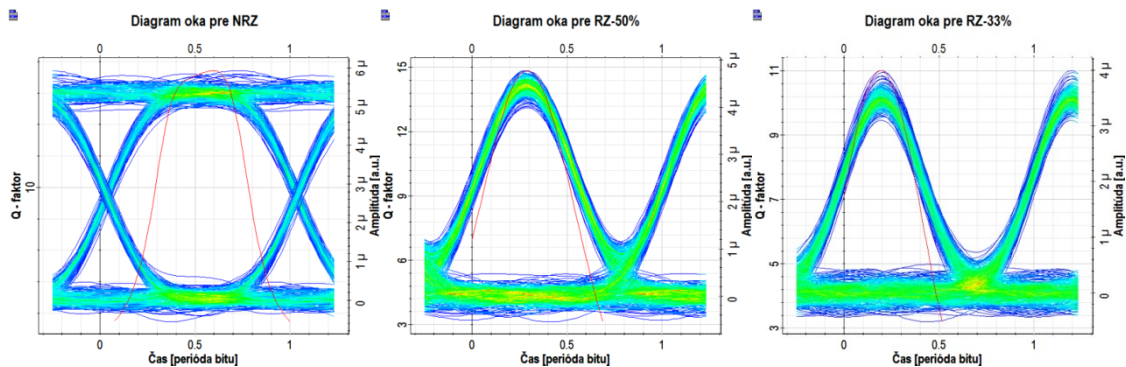




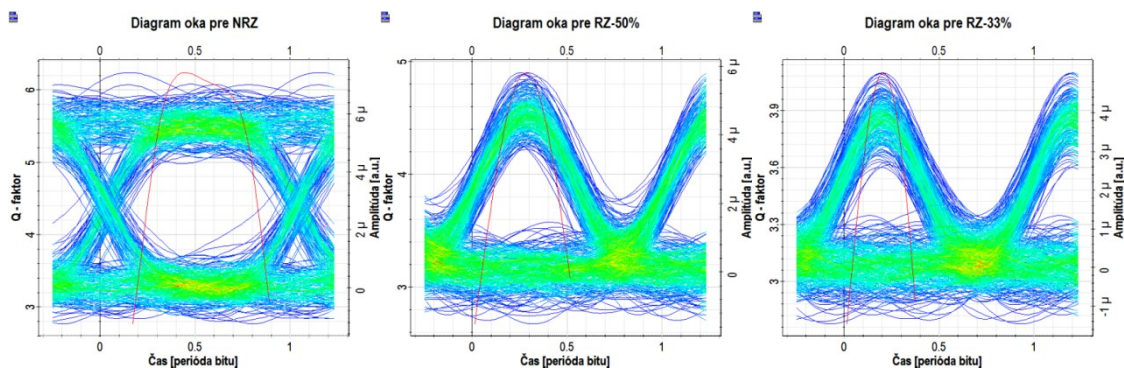
Obrázok 10.14: Hodnoty BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmom  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

Z obrázku 10.14 je opäť badateľné zníženie dosahu FSO spojenia v dôsledku zvýšenia prenosovej rýchlosti. Na kvalitu spojenia taktiež výrazne vplyvajú turbulencie, keď napríklad pri NRZ je v dôsledku kolísania hodnôt BER znížený dosah až o 300 m oproti prostrediu so slabou turbulenciou.

Na obrázkoch 10.15 a 10.16 je zobrazené vizuálne porovnanie vplyvu prenosovej rýchlosti na kvalitu FSO spojenia. Vzdialenosť od vysieláča je nastavená na 2 km.



Obrázok 10.15: Diagramy oka pre moduláciu OOK s linkovými kódmi NRZ, RZ-50% a RZ-33% pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

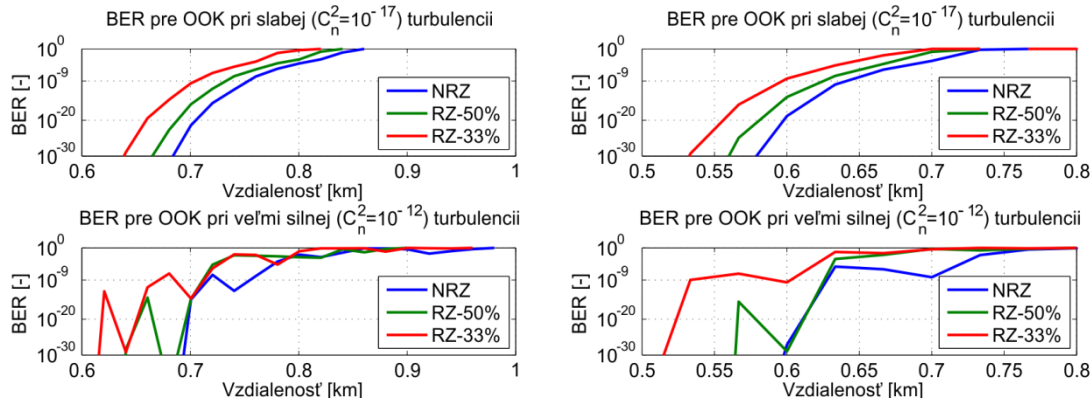


Obrázok 10.16: Diagramy oka pre moduláciu OOK s linkovými kódmi NRZ, RZ-50% a RZ-33% pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

Vyššie uvedené diagramy dokazujú zhoršenie kvality v dôsledku zvýšenia prenosovej rýchlosti zo  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  na  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ . Tak ako doteraz aj teraz sa javí najlepším variantom linkový kód NRZ.

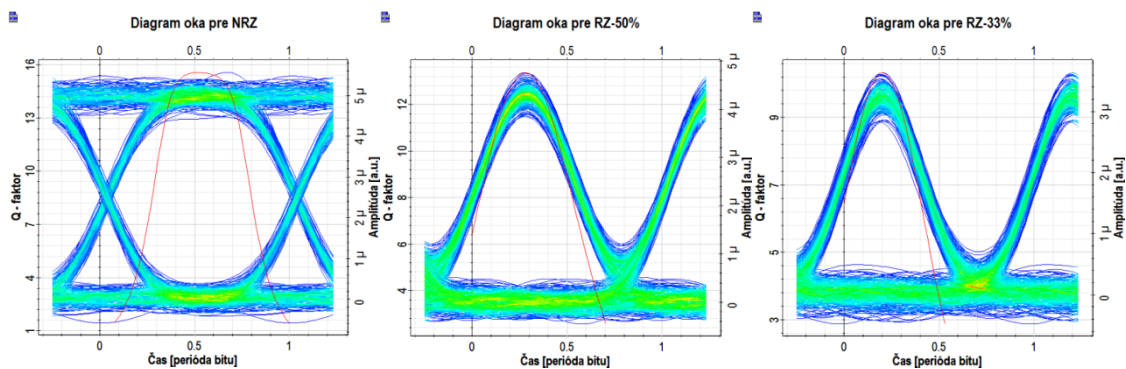
### Útlm prostredia $28,9 \text{ dB/km}$

Poslednou časťou simulácií modulácie OOK je simulovanie s nastaveným útlmom na hodnotu  $28,9 \text{ dB/km}$ . Obrázok 10.17 zobrazuje hodnoty BER pre vlnové dĺžky  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) a pre obe úrovne sily turbulencie  $C_n^2 = 10^{-17}$  (horná časť obrázka) a  $C_n^2 = 10^{-12}$  (dolná časť obrázka).

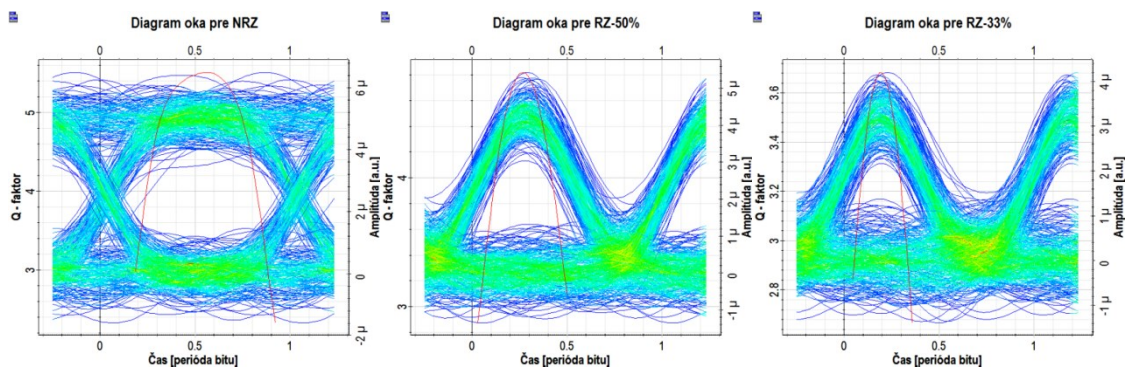


Obrázok 10.17: Hodnoty BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmom  $28,9 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

V tejto simulácii dosiahla dĺžka spojenia hodnotu maximálne  $750 \text{ m}$  (NRZ) pre prenosovú rýchlosť  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  a  $640 \text{ m}$  (NRZ) pre prenosovú rýchlosť  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ . Opäť dosiahol najlepšie výsledky linkový kód NRZ nasledovaný linkovým kódom RZ-50% a RZ-33%. Silná turbulencia znižuje dosah približne ešte o  $100 \text{ m}$ . Obrázky 10.18 a 10.19 ukazujú rozdiel kvality spojenia v rovnakej vzdialenosti a s rôznymi prenosovými rýchlosťami.



Obrázok 10.18: Diagramy oka pre moduláciu OOK s linkovými kódmi NRZ, RZ-50% a RZ-33% pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $28,9 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$



Obrázok 10.19: Diagramy oka pre moduláciu OOK s linkovými kódmi NRZ, RZ-50% a RZ-33% pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $28,9 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

### 10.1.3 Zhrnutie výsledkov simulácií pre moduláciu OOK

V tejto časti práce bola testovaná modulácia OOK s použitím troch typov linkových kódov: NRZ, RZ-50%, RZ-33%. Na vytvorené FSO spojenie bol simulovaný vplyv atmosférických podmienok dvoma spôsobmi. Prvým bol útlm, ktorý určoval viditeľnosť podľa tabuľky 2.1 boli postupne nastavované hodnoty  $0,47 \text{ dB/km}$ ,  $4,4 \text{ dB/km}$  a  $28,9 \text{ dB/km}$ . Vplyv útlmu bol jasný, a to taký, že výrazne znižoval dosah. Druhým atmosférickým vplyvom boli turbulencie, ktoré boli simulované pomocou štruktúrneho parametru indexu lomu. Silné turbulencie spôsobovali výrazné rozptyly hodnôt BER v dôsledku zmien indexu lomu a tým zhoršenie prijatej výkonovej úrovne, čo v konečnom dôsledku znamenalo zhoršenie kvality FSO spojenia.

Ďalším parametrom, ktorý sa menil bola prenosová rýchlosť. Boli použité  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ . Uvedené diagramy oka dobre znázornili aký vplyv má zvýšenie prenosovej rýchlosti na kvalitu FSO spojenia, pretože ako je známe, čím vyššia prenosová rýchlosť, tým menšia je perióda jedného bitu. Toto zmenšenie zvyšuje nároky na kvalitu a citlivosť na fotodetektor. Zhoršenie bolo možné pozorovať na veľkosti otvorenia oka, keď bolo otvorenie oka pri  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  menšie ako pri  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ .

Posledný parameter ktorý spôsobil výraznú zmenu v prenosových parametroch bola vlnová dĺžka, na ktorej dané FSO spojenie pracovalo. V simuláciách sú využité dve vlnové dĺžky: 850 nm a 1550 nm. Pri nasadení vlnovej dĺžky 850 nm došlo k výraznému poklesu čo sa týka dosahu spojenia. Spôsobil to fakt, že atmosféra má menšiu priepustnosť v okne vlnovej dĺžky 850 nm a v prípade vlnovej dĺžky 1550 nm.

V ďalšej časti práce budú skúmané modulácie QPSK a 4-QAM. Tieto modulácie budú porovnávané s moduláciou OOK s linkovým kódom NRZ, pretože práve tento linkový kód sa javil ako najlepší s pomedzi troch testovaných.

## 10.2 Modulácia QPSK

Modulácia QPSK bola už testovaná v praktickej časti na vplyv turbulencií spôsobených teplovzdušnými ventilátormi. Taktiež bol testovaný aj vplyv hmly na optický zväzok. Avšak tieto merania boli len na krátku vzdialenosť. Aj preto bude v tejto časti simulovaný vplyv turbulencií a poveternostných podmienok na optický zväzok modulovaný pomocou modulácie QPSK. Rozdielom medzi OOK a QPSK je to, že QPSK by mala byť detegovaná koherentne, zatiaľ čo OOK modulácia využíva priamu detekciu. Výsledky simulácií sú reprezentované rovnako ako pri OOK pomocou hodnoty BER.

Schéma zapojenia koherentnej detekcie QPSK v softvéri Optisystem sa nachádza v prílohe A na obrázku A.1. V simulácii sú využité väzobné členy s vložným útlmom 2 dB. Ako detektory sú použité 4 PIN detektory s vlastnosťami InGaAs. Schéma zapojenia pre nekoherentnú detekciu QPSK je zobrazená v prílohe A na obrázku A.2. Tabuľka 10.1 obsahuje nastavené parametre simulácie, ktoré ostali rovnaké ako pri simuláciách s moduláciou OOK.

### 10.2.1 Výsledky simulácií QPSK modulácie na vlnovej dĺžke 1550 nm

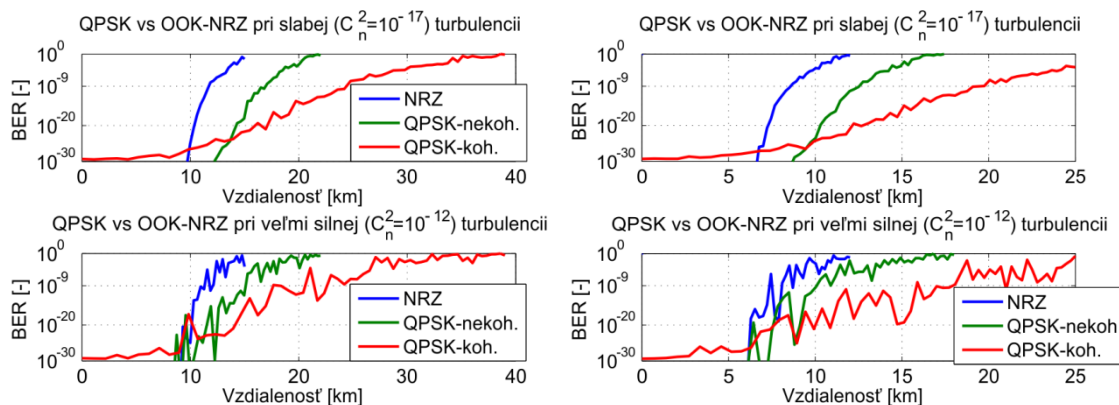
V tejto časti simulácií budú testované nasledujúce modulácie: OOK-NRZ, QPSK detegované nekoherentne a QPSK detegované koherentne.

#### Útlm prostredia 0,47 dB/km

Na obrázku 10.20 je vidieť že koherentné QPSK dosahuje oveľa lepšie hodnoty oproti ostatným dvom priebehom. Je to spôsobené tým, že ak je použitá koherentná detekcia QPSK, FSO spojenie je oveľa odolnejšie na nelinearity v atmosfére.

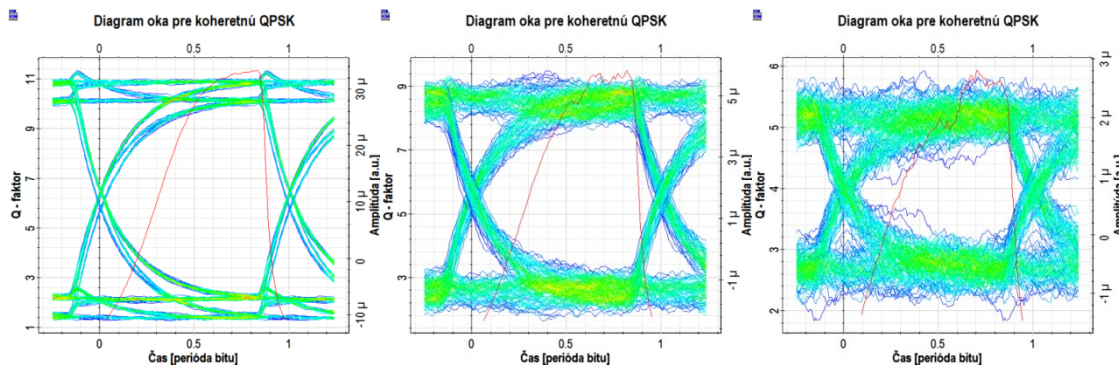
Medzi krivkami pre OOK-NRZ a nekoherentné QPSK je rozdiel hlavne v dosahu FSO spojenia, keďže tvar kriviek je podobný. Zníženie dosahu spôsobuje aj vyššia prenosová rýchlosť. Vplyv turbulencií je viditeľný na všetkých troch variantoch, avšak po nasadení rýchlosti 1,25 Gbit.s<sup>-1</sup> sa ich vplyv ešte zvýšil.



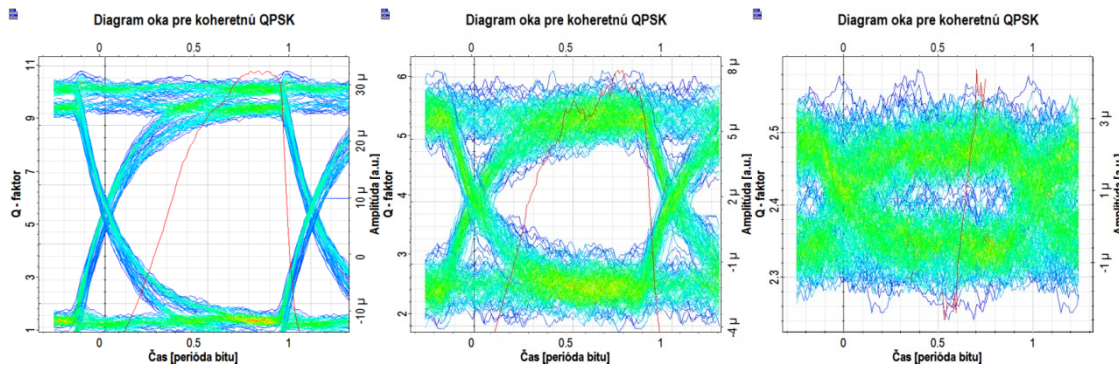


Obrázok 10.20: BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmom  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

Keďže hlavným cieľom je skúmanie koherentne detegovanej QPSK, tak tento krát už nebudú zobrazené diagramy oka pre všetky vykreslené priebehy, ale len pre koherentne detegovanú QPSK v troch rôznych vzdialenostiach: 5 km, 15 km a 25 km a prenosových rýchlostiach  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ . Tieto diagramy oka sú zobrazené na obrázkoch 10.21 a 10.22.



Obrázok 10.21: Diagramy oka pre moduláciu QPSK s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

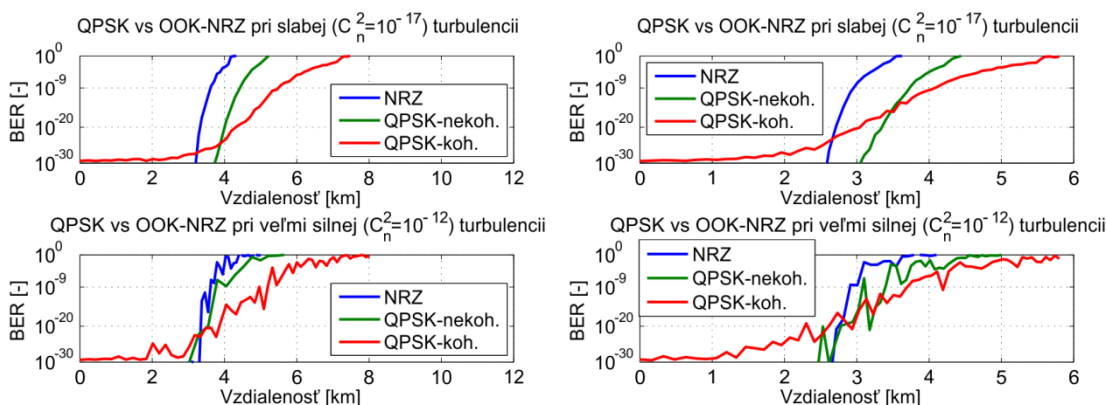


Obrázok 10.22: Diagramy oka pre moduláciu QPSK s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

Z diagramov oka je poznať degradácia signálu v dôsledku zvýšenia prenosovej rýchlosti a zvyšovania vzdialenosti od vysielača. Zhoršenie signálu je vyjadrené väčším zatvorením oka.

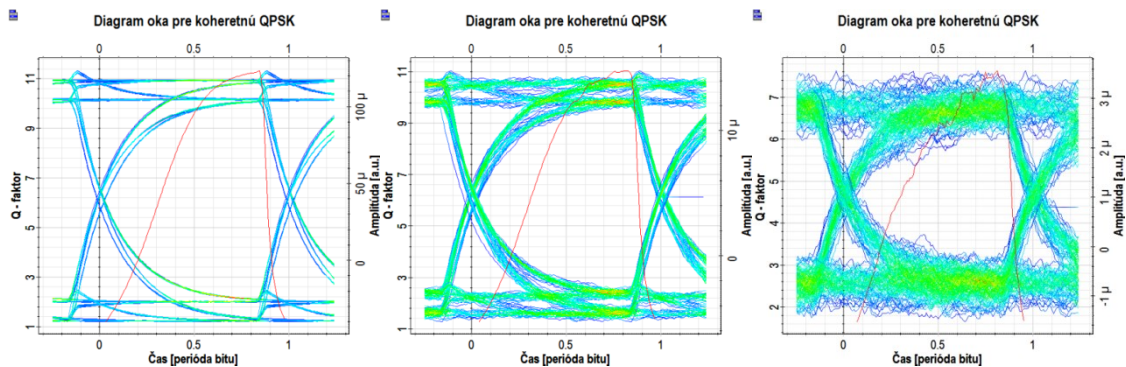
#### Útlm prostredia 4,4 dB/km

Obrázok 10.23 zobrazuje hodnoty BER pre OOK-NRZ, QPSK detegované nekoherentne, resp. koherentne. Ako sa dalo čakať, útlm spôsobil výrazné zníženie dosahu FSO spojenia. Zaujímavý je graf vpravo hore, kde je vidieť, že rozdiel medzi dosahom spojenia nekoherentne detegovanej QPSK a koherentne detegovanej QPSK nie je taký výrazný ako tomu bolo pri útlme 0,47 dB/km na obrázku 10.20. Ďalej, z grafov so silnou turbulenciou je vidieť, že turbulencie vplyvajú väčšmi na nekoherentne detegované QPSK ako na OOK-NRZ, pretože oproti prostrediu so slabou turbulenciou sú si ich priebehy BER bližšie v prostredí so silnou turbulenciou. Koherentne detegovaná PQSK dosahuje naďalej najlepšie výsledky.

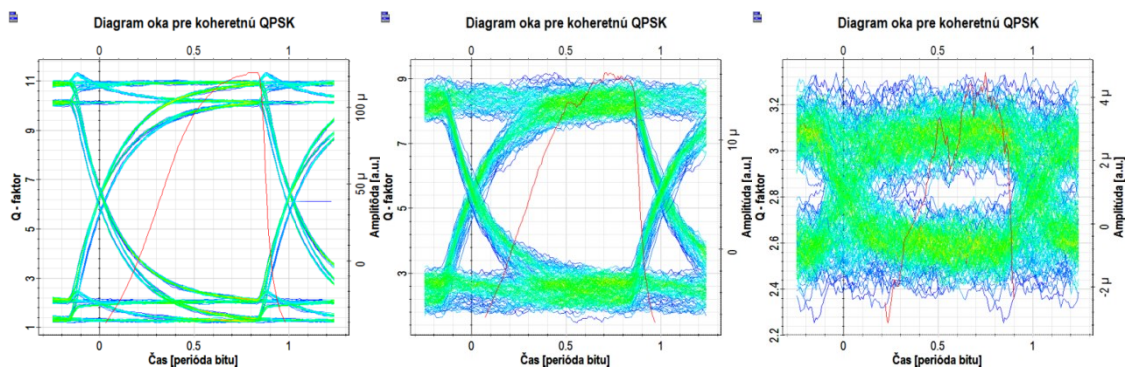


Obrázok 10.23: BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti 155 Mbit.s<sup>-1</sup> (vľavo) a 1,25 Gbit.s<sup>-1</sup> (vpravo) s útlmom 4,4 dB/km na  $\lambda=1550$  nm

Na obrázkoch 10.24 a 10.25 sa nachádzajú diagramy oka porovnanie závislosti kvality FSO spojenia na vzdialenosti, pričom zvolené vzdialenosti boli 1 km, 3 km a 5 km. Postupným zvyšovaním vzdialenosti sa diagram oka viac uzatvára a Q – faktor sa znižuje, znižuje sa teda kvalita FSO spojenia. Dobré je aj vidieť vplyv použitia vyššej rýchlosti (1,25 Gbit.s<sup>-1</sup>), keď pri vzdialenosti 5 km dosahuje Q – faktor hodnotu len 3,5 oproti prenosovej rýchlosti 155 Mbit.s<sup>-1</sup>, kde je Q –faktor viac ako 7,5. Treba poznamenať, že hodnote BER  $10^{-9}$  odpovedá Q – faktor približne 6.



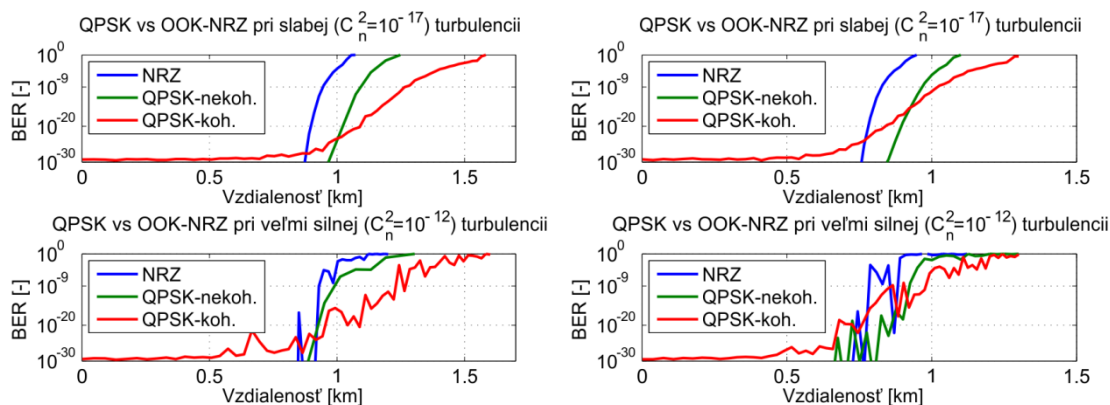
Obrázok 10.24: Diagramy oka pre moduláciu QPSK s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$



Obrázok 10.25: Diagramy oka pre moduláciu QPSK s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

### Útlm prostredia $28,9 \text{ dB/km}$

Poslednou časťou simulácií QPSK v rámci vlnovej dĺžky  $1550 \text{ nm}$  sú simulácie s útlmom trasy nastaveným na  $28,9 \text{ dB/km}$ , čo podľa tabuľky 2.1 odpovedá vplyvu stredne hustej hmly. Obrázok 10.26 zobrazuje správanie FSO spojenia pri nastavení spomenutého útlmu.

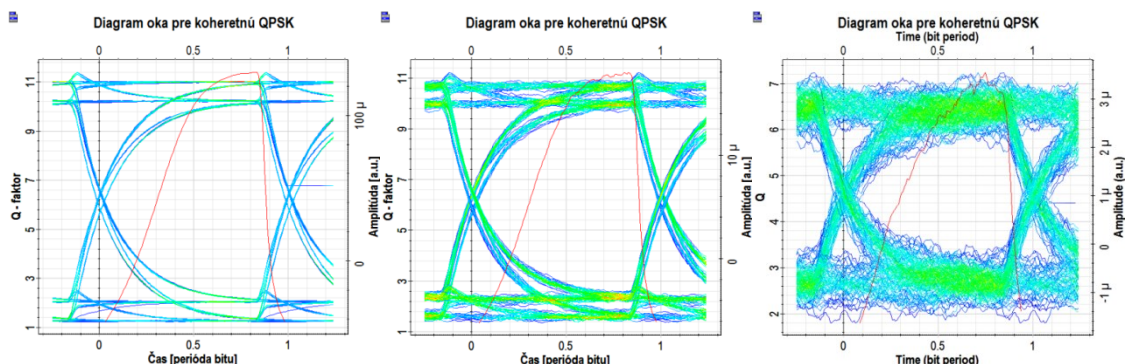


Obrázok 10.26: BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmom  $28,9 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

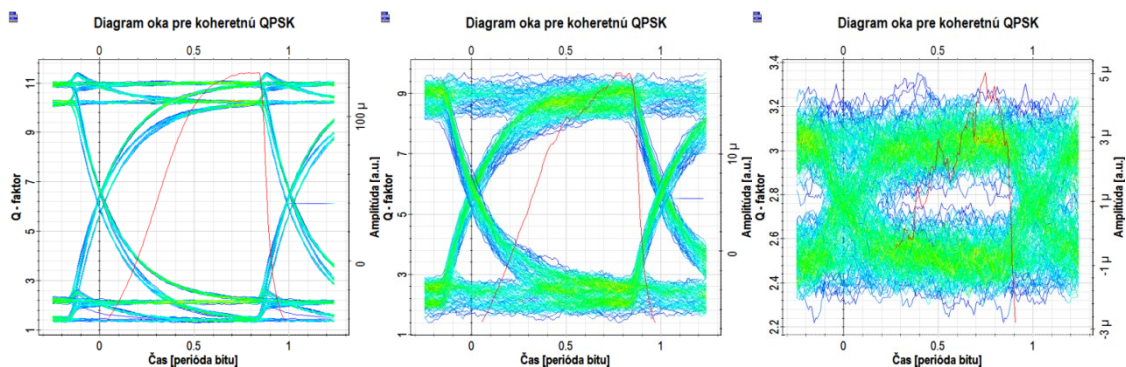


Krivky na obrázku 10.26 sú veľmi podobné krivkám na obrázku 10.23 s tým rozdielom, že útlm zvýšený na 28,9 dB/km spôsobil oveľa väčšie skrátenie dosahu FSO spojenia. Na spodných grafoch opäť vidieť vplyv turbulencií, keď sú hodnoty BER omnoho viac rozptýlené ako pri prostredí so slabou turbulenciou.

Tak ako v predošlých simuláciách aj teraz sú zobrazené na obrázkoch 10.27 a 10.28 diagramy oka vyjadrujúce vplyv prenosovej rýchlosti na kvalitu FSO spojenia pomocou diagramov oka.



Obrázok 10.27: Diagramy oka pre moduláciu QPSK s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme 28,9 dB/km na  $\lambda=1550 \text{ nm}$



Obrázok 10.28: Diagramy oka pre moduláciu QPSK s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme 28,9 dB/km na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

Opäť pomerne prudké zhoršenie kvality FSO spojenia pri prenosovej rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ , z dôvodu zvyšovania vzdialenosti, alebo inými slovami znižovania prijatého výkonu. Vo vzdialenosti 400 m je ešte diagram oka pre obe prenosové rýchlosti ( $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ) veľmi podobný, ale potom nastáva väčšie uzatváranie oka pri prenosovej rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ .

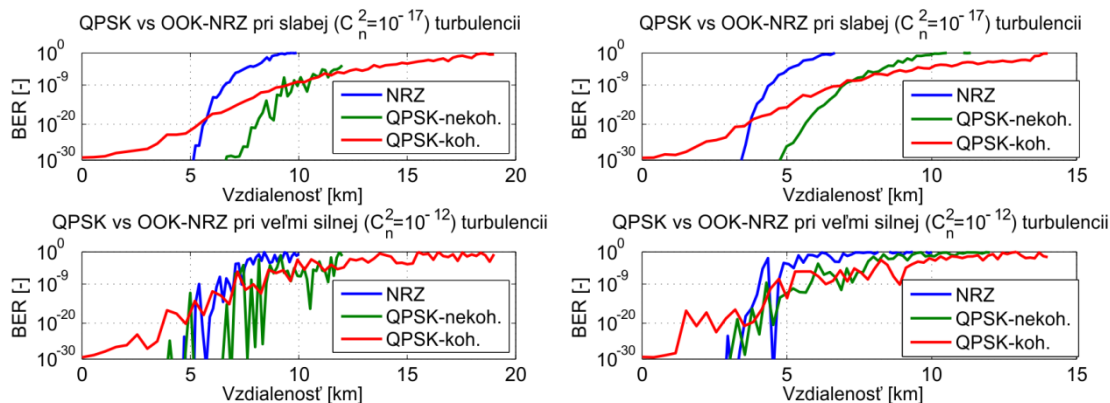
### 10.2.2 Výsledky simulácií QPSK modulácie na vlnovej dĺžke 850 nm

Druhou časťou simulácií QPSK modulácie, je simulovanie na vlnovej dĺžke 850 nm. Opäť budú porovnávané OOK-NRZ, nekoherentne detegovaná QPSK a koherentne detegovaná QPSK. Rovnako budú použité dve prenosové rýchlosti:  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ , a dve úrovne sily turbulencií:  $C_n^2 = 10^{-17}$  a  $C_n^2 = 10^{-12}$ .



### Útlm prostredia 0,47 dB/km

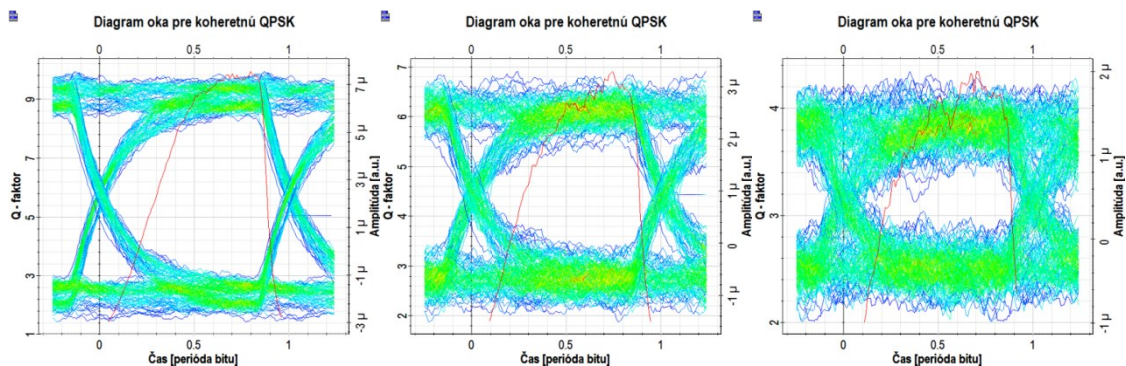
Obrázok 10.29 znázorňuje krivky hodnôt BER z jednotlivých simulácií OOK-NRZ a QPSK.



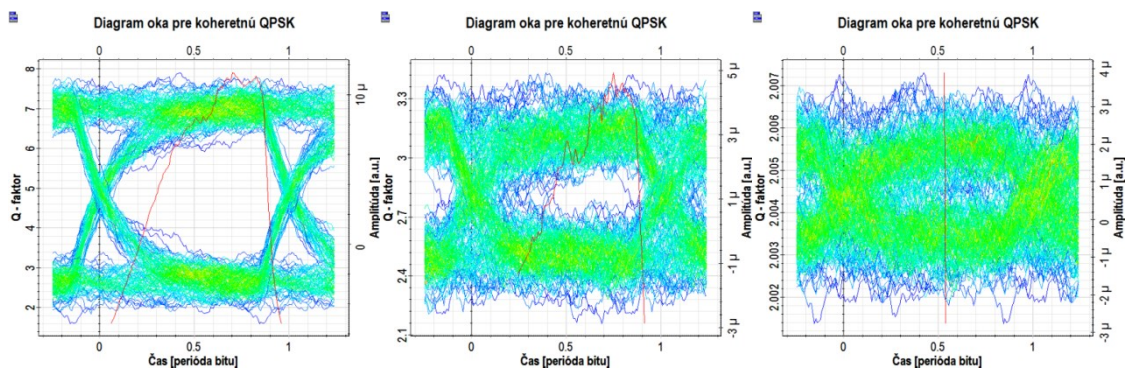
Obrázok 10.29: BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmom 0,47 dB/km na  $\lambda=850 \text{ nm}$

S nasadením vlnovej dĺžky 850 nm nastáva výrazná zmena pri modulácii QPSK s koherentnou detekciou. Nielenže sa oproti spojeniu s vlnovou dĺžkou 1550 nm (Obrázok 10.20) výrazne zmenšil dosah spojenia, ale výkonnosť koherentnej detekcie sa vyrovnala nekoherentnej detekcii a to či už pre prenosovú rýchlosť  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ , ale aj pre prenosovú rýchlosť  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ . Výhodou koherentnej detekcie ostáva väčšia odolnosť na turbulencie, pretože rozptyl hodnôt BER je menší ako pri ostatných dvoch typoch.

Obrázok 10.30 a 10.31 zobrazuje diagramy oka pre koherentne detegovanú QPSK vo vzdialenostiach 4 km, 8 km a 12 km. Aj pri použití vlnovej dĺžky 850 nm je viditeľné zhoršenie kvality z dôvodu nasadenia vyššej prenosovej rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  oproti prenosovej rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ .



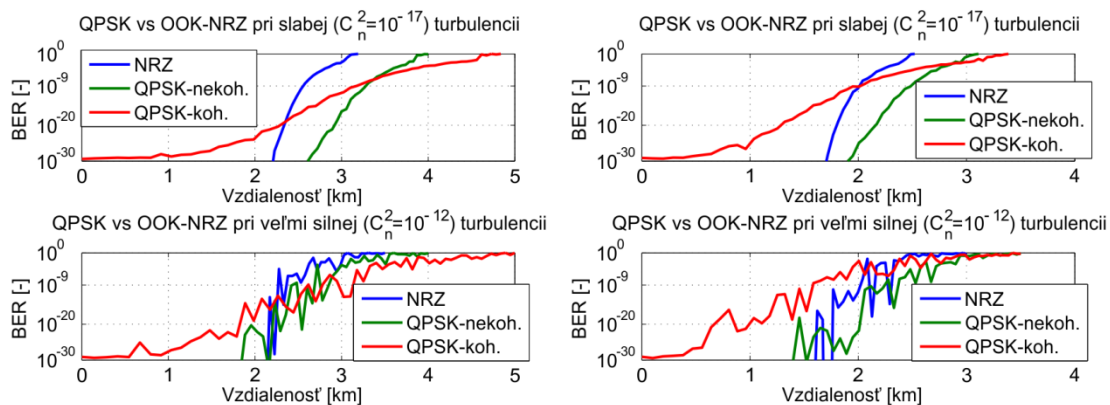
Obrázok 10.30: Diagramy oka pre moduláciu QPSK s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme 0,47 dB/km na  $\lambda=850 \text{ nm}$



Obrázok 10.31: Diagramy oka pre moduláciu QPSK s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

### Útlm prostredia $4,4 \text{ dB/km}$

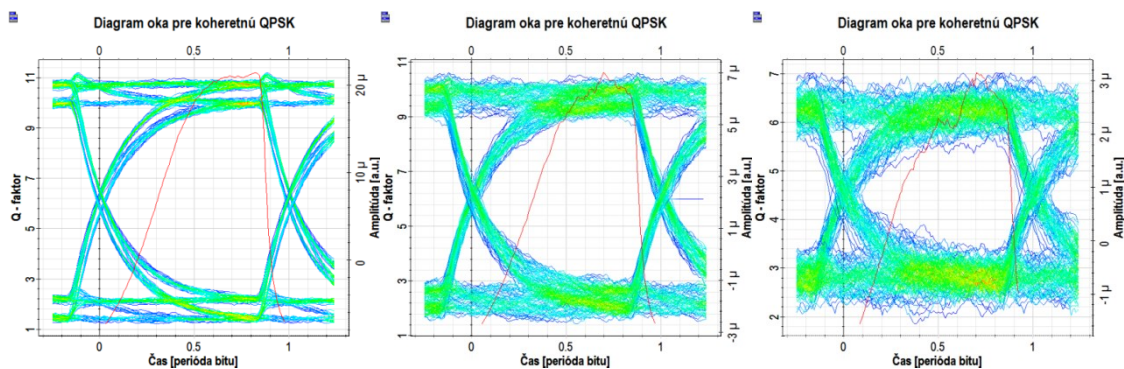
Krivky hodnôt BER pre jednotlivé modulácie s nastavením útlmu na  $4,4 \text{ dB/km}$  sú zobrazené na obrázku 10.32.



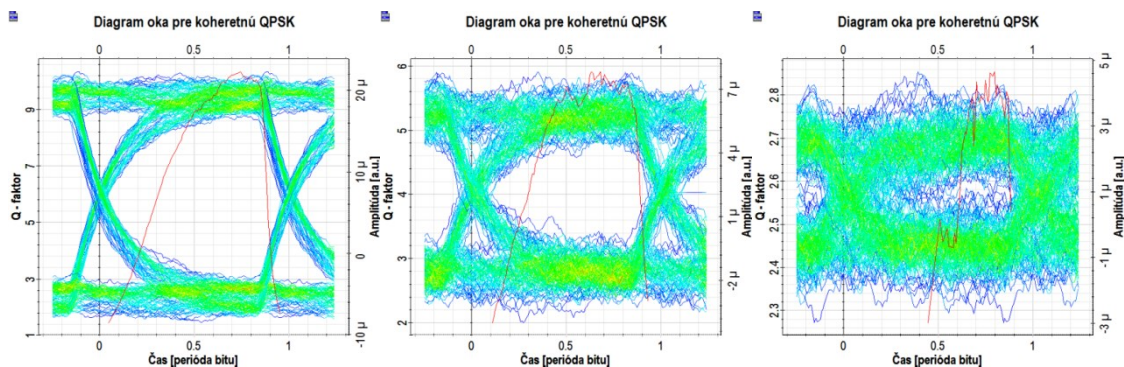
Obrázok 10.32: BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmom  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

Na obrázku 10.32 vznikol oproti rovnakej simulácii na vlnovej dĺžke  $1550 \text{ nm}$  veľký rozdiel čo sa týka koherentne detegovanej QPSK. Dosah spojenia sa pre spomínanú QPSK vyrovnal s nekoherentne detegovanou QPSK pri prenosovej rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ . Dokonca pri prenosovej rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  dosah spojenia klesol až na úroveň modulácie OOK-NRZ. Pri nastavení veľmi silnej turbulencie a prenosovej rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo dole), sa javí koherentne detegovaná QPSK ako najhoršia spomedzi všetkých testovaných modulácií.

Na obrázkoch 10.33 a 10.34 sú diagramy oka pre koherentne detegovanú QPSK vo vzdialenostiach  $1 \text{ km}$ ,  $2 \text{ km}$  a  $3 \text{ km}$ , na ktorých je potvrdené výrazné zníženie kvality spojenia pri nastavení rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ .



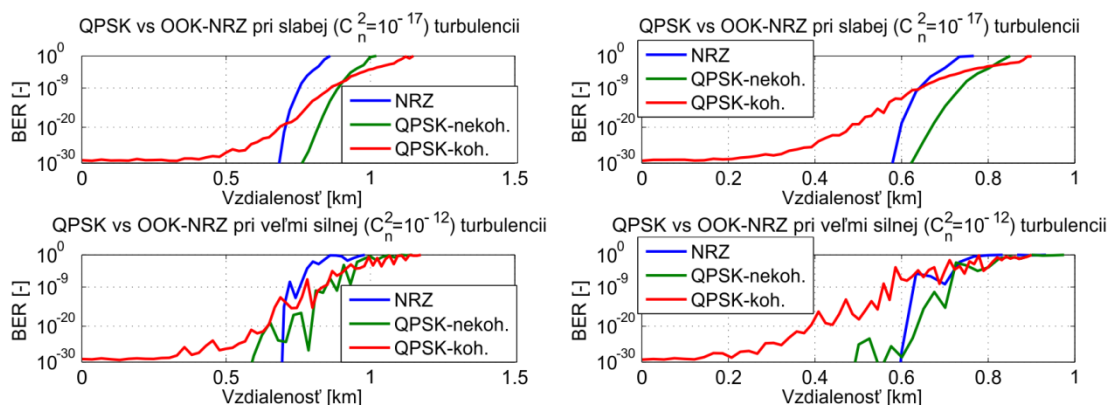
Obrázok 10.33: Diagramy oka pre moduláciu QPSK s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$



Obrázok 10.34: Diagramy oka pre moduláciu QPSK s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

### Útlm prostredia $28,9 \text{ dB/km}$

Táto časť obsahuje posledné simulácie modulácie QPSK, keď je útlm prostredia nastavený na  $28,9 \text{ dB/km}$ .



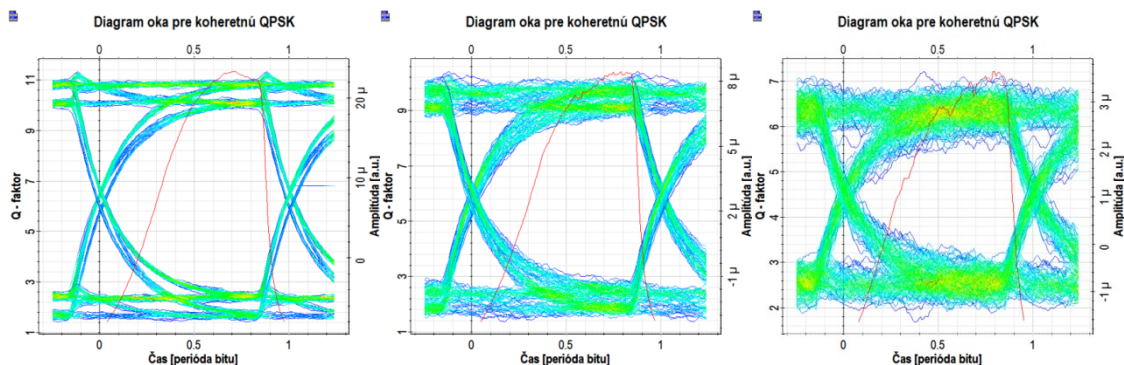
Obrázok 10.35: BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmom  $28,9 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

Obrázok 10.35 zobrazuje priebeh simulácií pre jednotlivé modulačné formáty. Výsledky simulácie zobrazené na grafoch sú z hľadiska tvaru kriviek veľmi podobným tým pre útlm

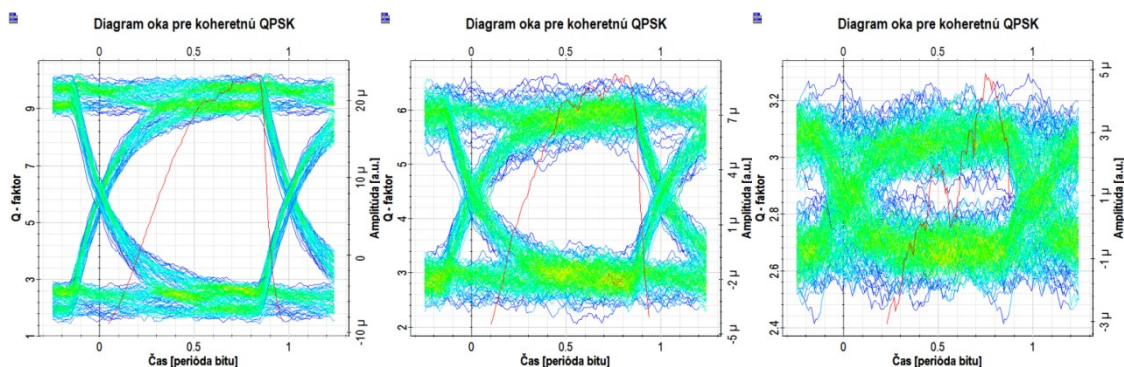


4,4 dB/km (Obrázok 10.33). Opäť je pri prenosovej rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  dosah spojenia rovnaký pre oba typy detegovania QPSK a pri prenosovej rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  je dosah spojenia koherentne detegovanej QPSK rovnaký ako pri OOK-NRZ. Vplyv turbulencií dosah ešte zmenšil a koherentná QPSK sa javí ako najhoršia.

Obrázky 10.36 a 10.37 zobrazujú diagramy oka pre koherentnú QPSK vo vzdialenostiach 400 m, 600 m a 800 m. Tak ako vo všetkých predošlých prípadoch aj teraz prenosová rýchlosť  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  vykazuje horšie vlastnosti FSO spojenia ako prenosová rýchlosť  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ .



Obrázok 10.36: Diagramy oka pre moduláciu QPSK s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme 28,9 dB/km na  $\lambda=850 \text{ nm}$



Obrázok 10.37: Diagramy oka pre moduláciu QPSK s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme 28,9 dB/km na  $\lambda=850 \text{ nm}$

### 10.3 Modulácia 4-QAM

Posledným typom testovanej modulácie je modulácia 4-QAM. 4-QAM je podobná QPSK modulácii, s tým rozdielom, že pri 4-QAM sú informačné bity zakódované pomocou fázy a amplitúdy a pri QPSK sú informačné bity zakódované len pomocou fázy. Podrobnejší popis je možné nájsť v kapitole 6.3.

Simulácie s moduláciou 4-QAM sú veľmi podobné simuláciám modulácie QPSK. Prakticky všetky nastavenia zostávajú rovnaké, nastane len výmena Generátoru PSK sekvencie za Generátor QAM sekvencie a Dekodéru PSK sekvencie za Dekodér QAM sekvencie. Celé

schéma zapojenia koherentne detegovanej 4-QAM je zobrazené v prílohe A na obrázku A.3. Schéma nekoherentne detegovanej 4-QAM je v prílohe A na obrázku A.4.

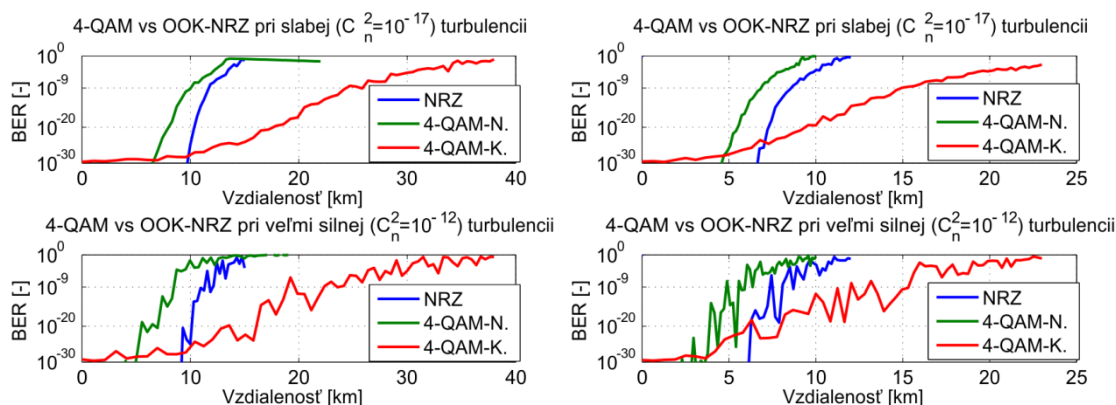
Na obrázkoch budú zobrazené výsledky simulácií, v ktorých bude porovnanie medzi OOK-NRZ, nekoherentnou 4-QAM a koherentnou 4-QAM. Ostatné parametre simulácie ostali rovnaké ako pri QPSK a OOK a sú zobrazené v tabuľke 10.1.

### 10.3.1 Výsledky simulácií 4-QAM modulácie na vlnovej dĺžke 1550 nm

V prvej časti simulácií 4-QAM sa nachádzajú výsledky s vlnovou dĺžkou 1550 nm. Postupne budú nastavované prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  a útlmy prostredia  $0,47 \text{ dB/km}$ ,  $4,4 \text{ dB/km}$  a  $28,9 \text{ dB/km}$ . Sú to útlmy simulujúce určité poveternostné podmienky a ich interpretácia je popísaná v tabuľke 2.1. Posledným parametrom, ktorý sa bude meniť je štruktúrny parameter indexu lomu, ktorú vyjadruje úroveň sily turbulencií. Hodnoty pre simuláciu sú:  $C_n^2 = 10^{-17}$  (slabá turbulencia) a  $C_n^2 = 10^{-12}$  (veľmi silná turbulencia).

#### Útlm prostredia $0,47 \text{ dB/km}$

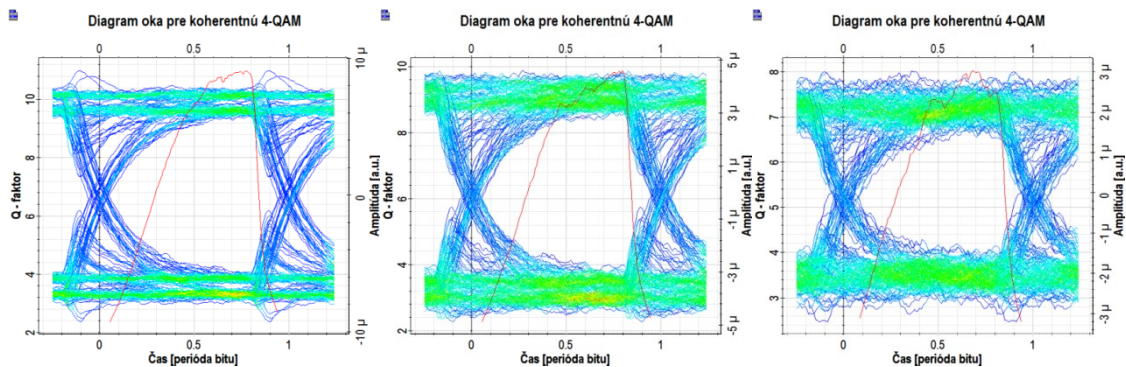
Obrázok 10.38 znázorňuje hodnoty BER pre OOK-NRZ, nekoherentnú 4-QAM a koherentnú 4-QAM pri prenosových rýchlostiach  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s nastavením turbulencií na  $C_n^2 = 10^{-17}$  (horné grafy) a  $C_n^2 = 10^{-12}$  (dolné grafy).



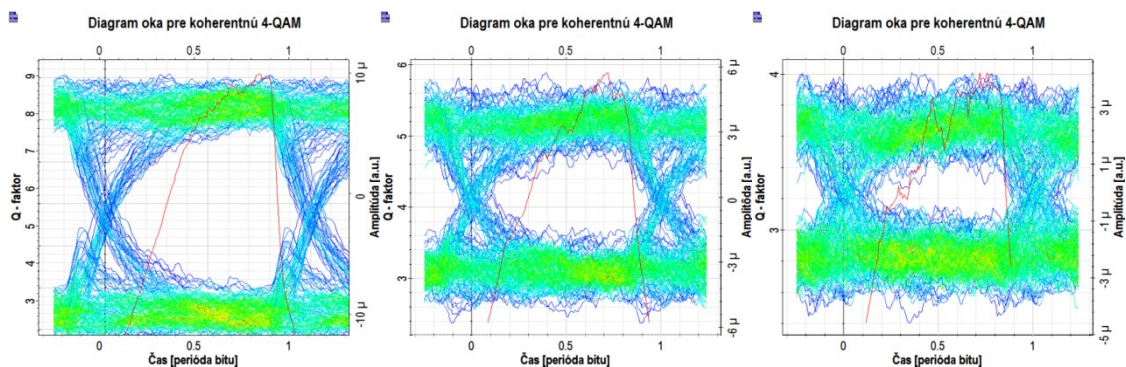
Obrázok 10.38: BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmom  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

Z grafov vyššie vidieť, že podobne ako u koherentnej QPSK aj tu má najväčší dosah koherentná 4-QAM. Zmenou u 4-QAM je, že nekoherentná 4-QAM má menší dosah ako OOK-NRZ, zatiaľ čo u QPSK modulácie to bolo naopak. Veľký rozdiel v dosahu je aj pri použití rôznych prenosových rýchlostí, keď pri použití prenosovej rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  je dosah približne o 10 km menší ako pri prenosovej rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ . Veľmi silné turbulencie spôsobujú ďalšie zníženie dosahu a to pri všetkých moduláciách.

Porovnanie vplyvu prenosovej rýchlosti na kvalitu FSO spojenia je zobrazené pomocou diagramov oka na obrázkoch 10.39 a 10.40. Diagramy oka sú zaznamenané vo vzdialenostiach 10 km, 15 km a 20 km.



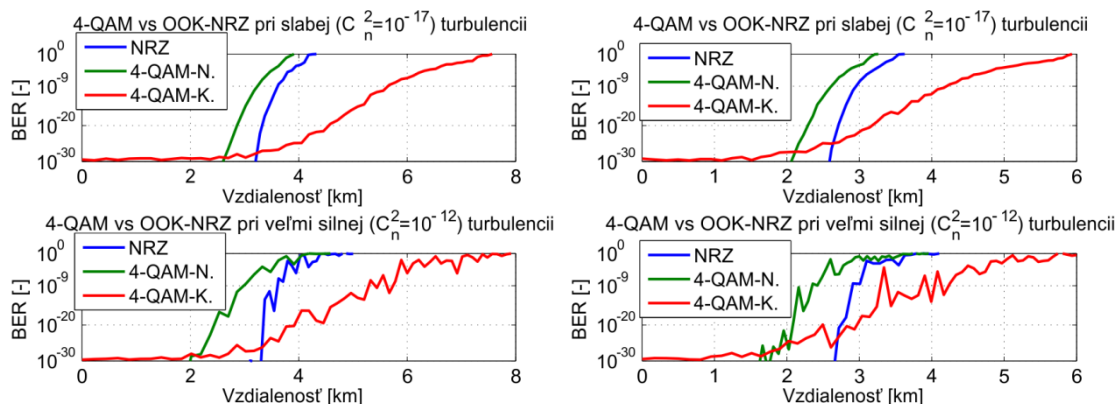
Obrázok 10.39: Diagramy oka pre moduláciu 4-QAM s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$



Obrázok 10.40: Diagramy oka pre moduláciu 4-QAM s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

Rozdiel medzi prenosovými rýchlosťami je dobre vidieť na poslednom diagrame pre každú rýchlosť, keď pri  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  je Q-faktor nad hodnotu 6 a pri  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  je už pod touto hodnotou, čo značí, že nedosahuje hraničnú hodnotu BER  $10^{-9}$ .

#### Útlm prostredia $4,4 \text{ dB/km}$

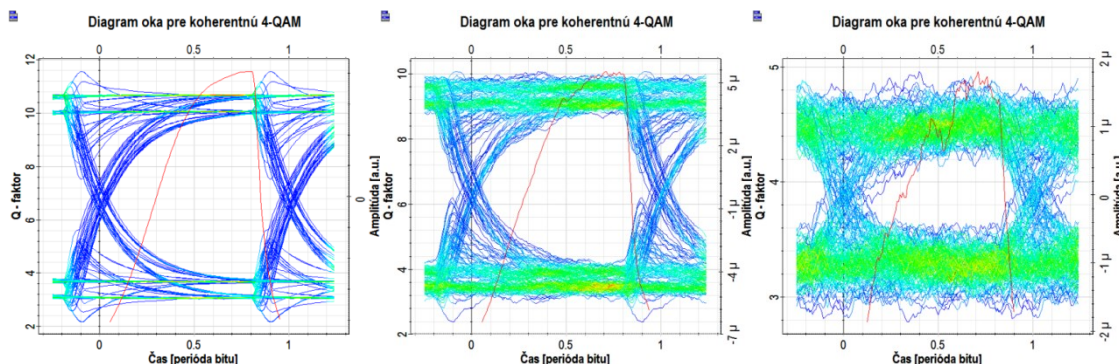


Obrázok 10.41: BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmom  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

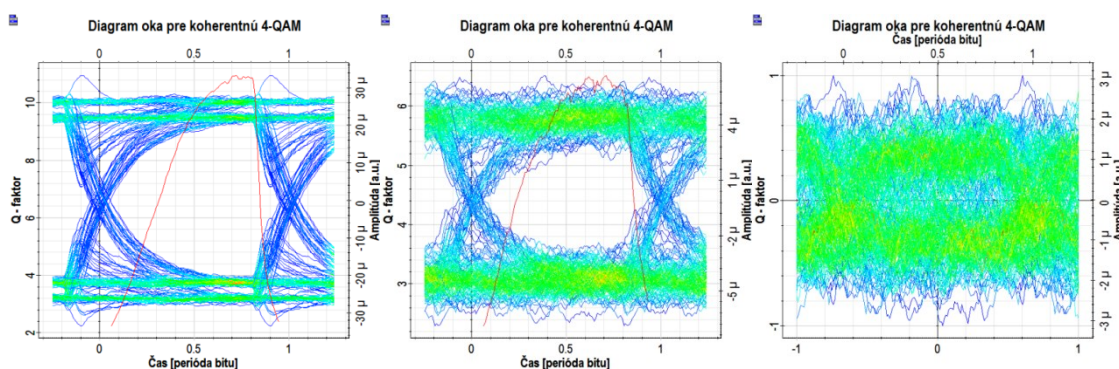


Výsledky simulácií pri útlme 4,4 dB/km, sú podobné ako pri útlme 0,47 dB/km. Rozdielom je len zníženie dosahu spojenia, čo je pochopiteľné keďže sa útlm 10 krát zväčšil. Stále je však na tom najlepšie koherentná 4-QAM a najhoršie nekoherentná 4-QAM.

Nasleduje opäť porovnanie kvality spojenia v závislosti na prenosovej rýchlosti pomocou diagramov oka. Diagramy sú zobrazené na obrázkoch 10.42 až 10.43, pričom vzdialenosti boli nastavené na 2 km, 4 km a 6 km.



Obrázok 10.42: Diagramy oka pre moduláciu 4-QAM s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme 4,4 dB/km na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

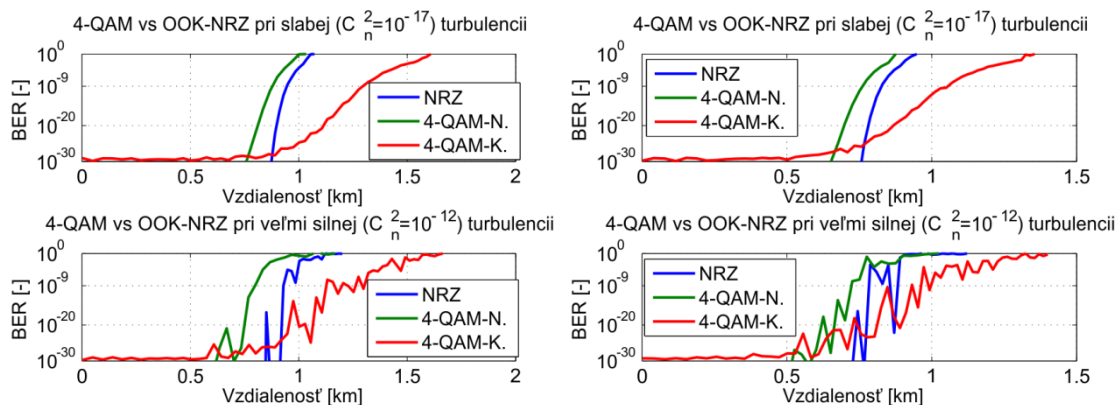


Obrázok 10.43: Diagramy oka pre moduláciu 4-QAM s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme 4,4 dB/km na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

### Útlm prostredia 28,9 dB/km

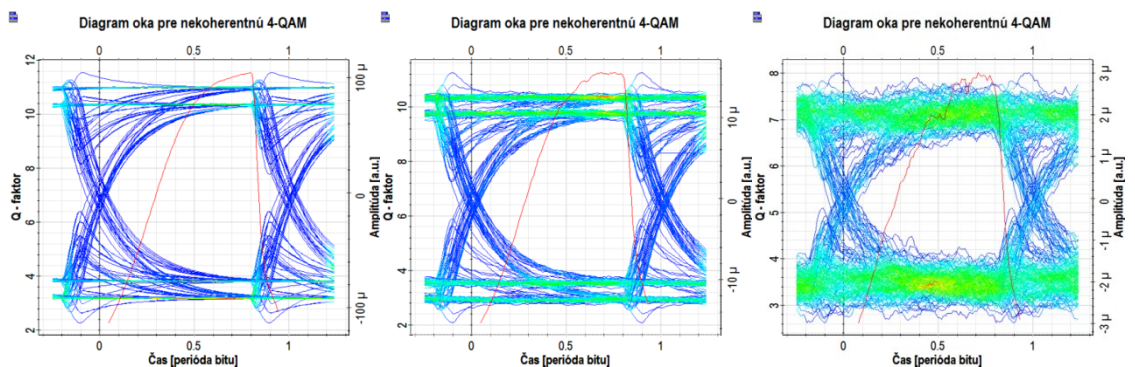
Na obrázku 10.44 je zobrazený priebeh poslednej simulácie v rámci vlnovej dĺžky 1550 nm. Útlm prostredia bol nastavený na hodnotu 28,9 dB, čo predstavuje stredne hustú hmlu.

Opäť je vidieť len zníženie dosah spojenia vplyvom útlmu, pričom tvar kriviek ostáva veľmi podobný predošlým dvom simuláciám s nižšími útlmami (0,47 dB/km a 4,4 dB/km). Zaujímavé je aj pozorovanie ako prudko sa znižuje kvalita v prípade OOK-NRZ a nekoherentnej 4-QAM oproti koherentnej 4-QAM. Nezmenil sa ani fakt, že najlepšie výsledky čo sa týka dosahu spojenia dosahuje koherentne detegovaná 4-QAM a najhoršie dosahuje nekoherentne detegovaná 4-QAM.

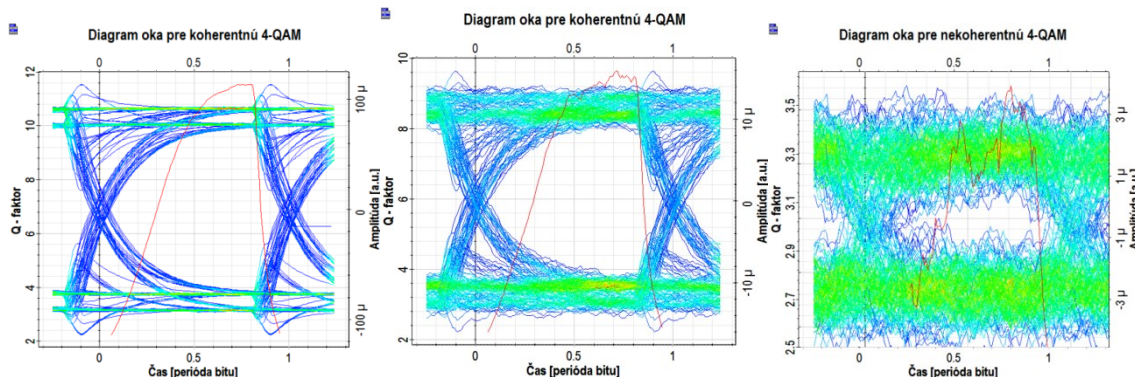


Obrázok 10.44: BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmou  $28,9 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

Aj teraz je urobené porovnanie dosahu spojenia v závislosti na prenosovej rýchlosti pre koherentnú 4-QAM. Diagramy oka sú zobrazené na obrázkoch 10.45 a 10.46, vo vzdialenostiach 400 m, 800 m a 1200 m.



Obrázok 10.45: Diagramy oka pre moduláciu 4-QAM s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $28,9 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$



Obrázok 10.46: Diagramy oka pre moduláciu 4-QAM s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $28,9 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=1550 \text{ nm}$

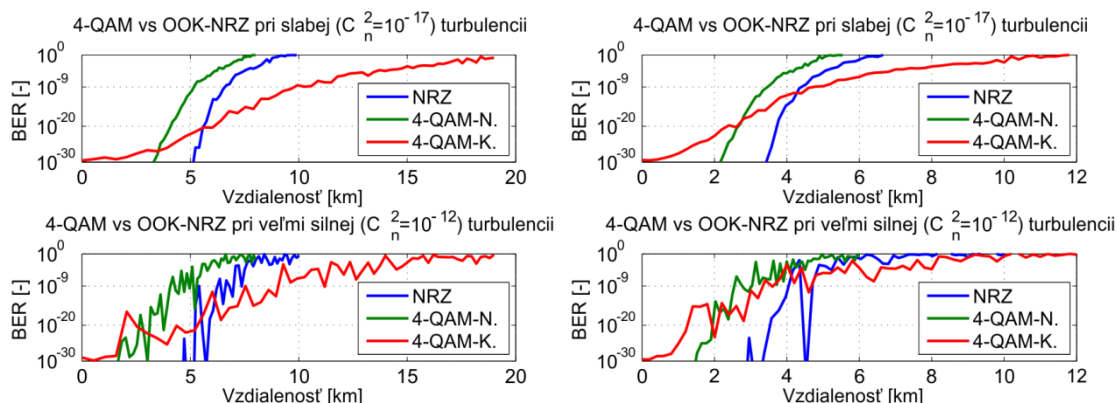


### 10.3.2 Výsledky simulácií 4-QAM modulácie na vlnovej dĺžke 850 nm

V druhej časti simulácií 4-QAM sa nachádzajú výsledky s vlnovou dĺžkou 850 nm. Postupne budú nastavované prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  a útlmy prostredia 0,47 dB/km, 4,4 dB/km a 28,9 dB/km. Sú to útlmy simulujúce určité poveternostné podmienky a ich interpretácia je popísaná v tabuľke . Posledným parametrom, ktorý sa bude meniť je štruktúrálly parameter indexu lomu, ktorú vyjadruje úroveň sily turbulencií. Hodnoty pre simuláciu sú:  $C_n^2 = 10^{-17}$  (slabá turbulencia) a  $C_n^2 = 10^{-12}$  (veľmi silná turbulencia).

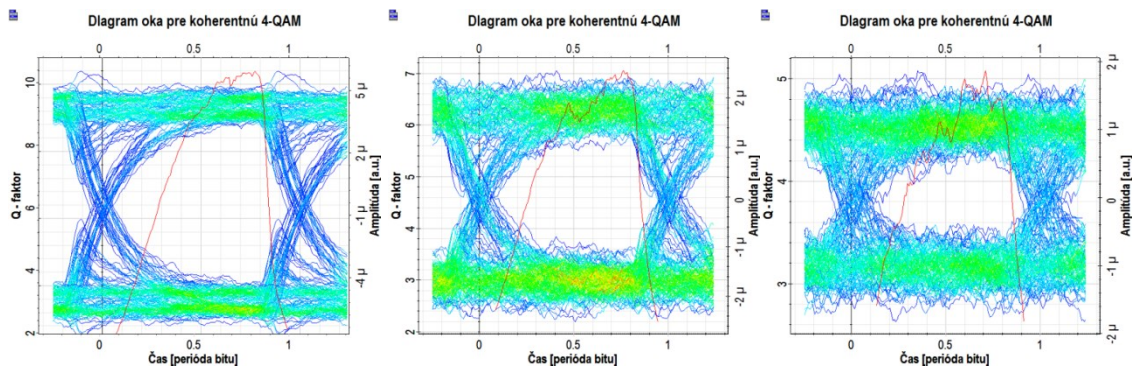
#### Útlm prostredia 0,47 dB/km

Na obrázku 10.47 sú zobrazené priebehy hodnôt pre jednotlivé modulácie. Koherentná 4-QAM má síce stále najväčší dosah, ale oproti simuláciám na vlnovej dĺžke 1550 nm je zaznamenaný výrazný pokles v dosahu spojenia. Navyše, pri nasadení prenosovej rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  dochádza k zníženiu dosahu koherentnej 4-QAM takmer o 5 km oproti prenosovej rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ , zatiaľ čo ostatné dve modulácie stratili len približne 1 km so svojho dosahu.

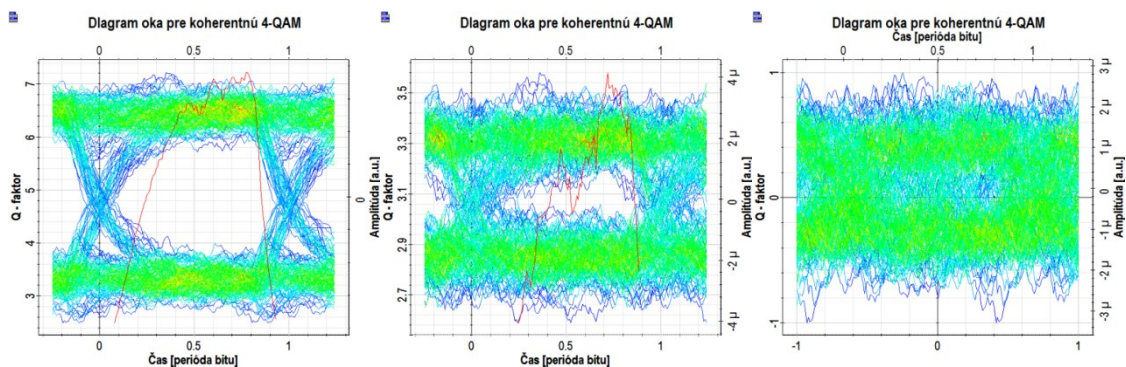


Obrázok 10.47: BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmom 0,47 dB/km na  $\lambda=850 \text{ nm}$

Z grafov vyššie je aj vidieť, že koherentná 4-QAM má pri prenosovej rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  takmer rovnaký dosah ako modulácia OOK-NRZ. Nastavenie veľmi silnej turbulencie dáva do popredia moduláciu OOK-NRZ. Zhoršenie kvality spojenia po nastavení prenosovej rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  je zobrazené aj pomocou diagramov oka na obrázkoch 10.48 a 10.49. Diagramy sú vyhotovené vo vzdialenostiach 4 km, 8 km a 12 km. Na týchto diagramoch je potvrdený veľký vplyv zvýšenia prenosovej rýchlosti, keď pri  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  a vzdialenosti 12 km sa spojenie úplne rozpadne.



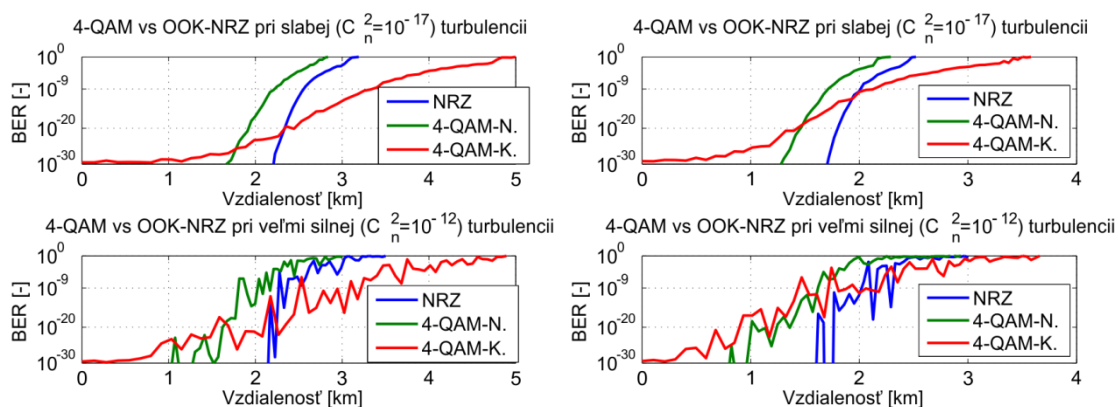
Obrázok 10.48: Diagramy oka pre moduláciu 4-QAM s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$



Obrázok 10.49: Diagramy oka pre moduláciu 4-QAM s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $0,47 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

#### Útlm prostredia $4,4 \text{ dB/km}$

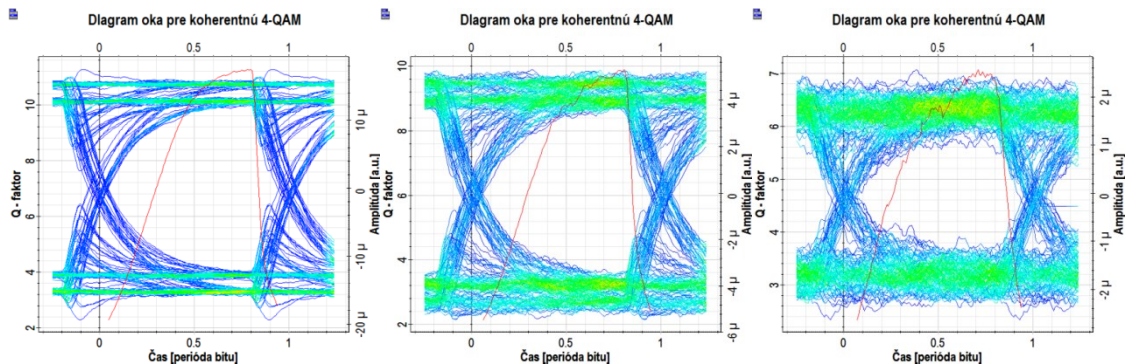
Obrázok 10.50 zobrazuje priebehy pre jednotlivé simulácie. Opäť je vidieť výrazný rozdiel v dosahu koherentnej 4-QAM v závislosti na použitej prenosovej rýchlosti. Prenosová rýchlosť  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  degradoval signál takmer o  $1,5 \text{ km}$  pri koherentnej 4-QAM, zatiaľ čo dosah ostatných dvoch modulácií klesol len približne o  $500 \text{ m}$ .



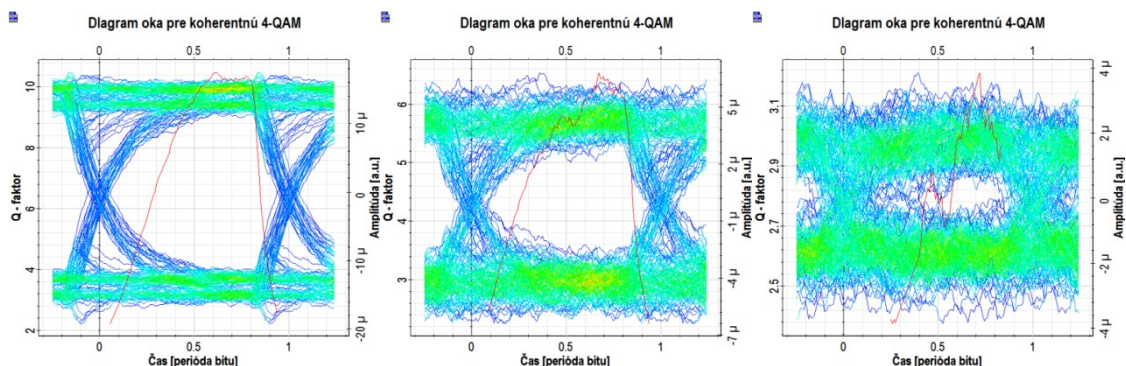
Obrázok 10.50: BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmom  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

Pri prenosovej rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  sa koherentná 4-QAM ešte viac priblížila modulácii OOK-NRZ. Ďalej je vidieť, že pri tejto rýchlosti koherentná 4-QAM reaguje na turbulencie horšie ako ostatné dve modulácie, keďže je spomedzi nich najhoršia.

Obrázky 10.51 a 10.52 zobrazujú zhoršenie kvality v závislosti na prenosovej rýchlosti. Diagramy sú vyhotovené vo vzdialenostiach 1 km, 2 km a 3 km.



Obrázok 10.51: Diagramy oka pre moduláciu 4-QAM s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

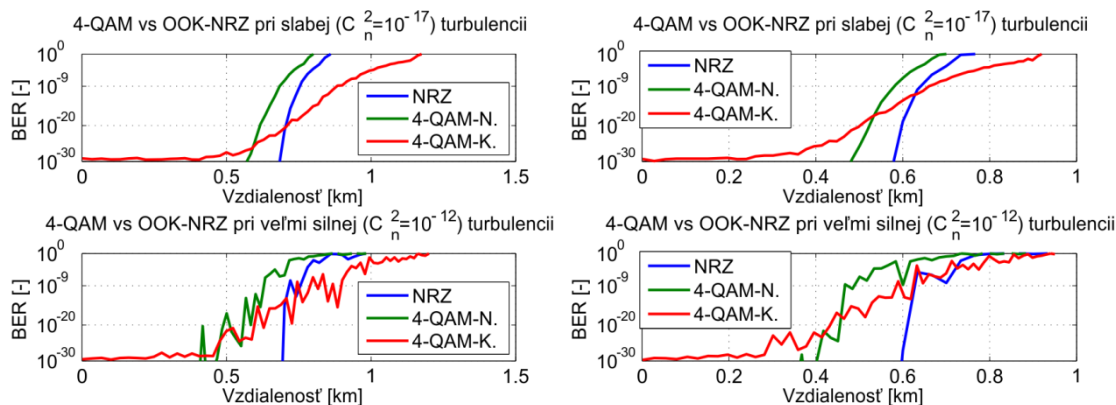


Obrázok 10.52: Diagramy oka pre moduláciu 4-QAM s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $4,4 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

#### Útlm prostredia $28,9 \text{ dB/km}$

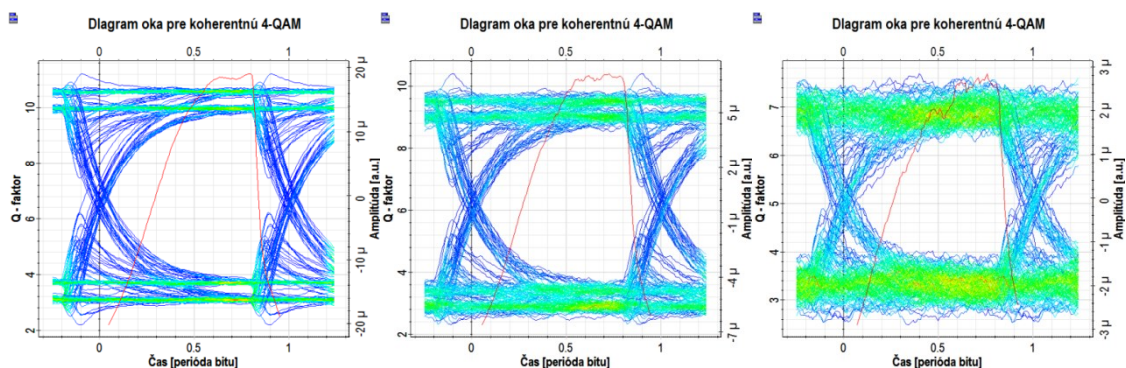
Túto časť tvoria posledné simulácie. Útlm je nastavený na  $28,9 \text{ dB/km}$ . Hodnoty BER pre jednotlivé modulácie sú zobrazené na obrázku 10.53. V tejto simulácii sa zdá byť najlepšou voľbou koherentná 4-QAM, avšak, len pre prenosovú rýchlosť  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ . Po nastavení prenosovej rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  a veľmi silnej turbulencie  $C_n^2 = 10^{-12}$  nastáva zhoršenie, ktoré dostáva do popredia moduláciu OOK-NRZ.



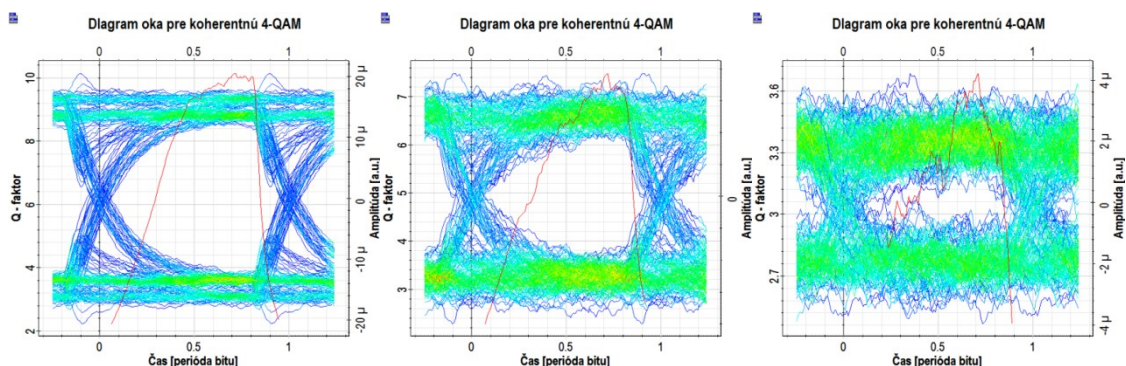


Obrázok 10.53: BER v závislosti na vzdialenosti pre prenosové rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$  (vľavo) a  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$  (vpravo) s útlmou  $28,9 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

Obrázky 10.54 a 10.55 znázorňujú diagramy oka pre koherentnú 4-QAM. Na týchto diagramoch je zobrazená závislosť kvality spojenia na prenosovej rýchlosti. Diagramy sú vyhotovené vo vzdialenostiach 400 m, 600 m a 800 m. Tak ako v predošlých prípadoch, aj teraz je vidieť zhoršenie po nasadení prenosovej rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ .



Obrázok 10.54: Diagramy oka pre moduláciu 4-QAM s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $155 \text{ Mbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $28,9 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$



Obrázok 10.55: Diagramy oka pre moduláciu 4-QAM s koherentnou detekciou pri rýchlosti  $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ ,  $C_n^2 = 10^{-17}$  a útlme  $28,9 \text{ dB/km}$  na  $\lambda=850 \text{ nm}$

## Záver

Diplomová práca sa zaoberá vplyvom atmosférických podmienok na modulovaný optický zväzok. Prvou časťou je praktické meranie vplyvu turbulencií na optický zväzok, ktorý je modulovaný a demodulovaný pomocou prístrojov USRP. Na ovládanie týchto prístrojov boli použité aplikácie vytvorené softvérom Labview. V aplikáciách sa nastavil typ modulácie a všetky ostatné parametre potrebné pre moduláciu. Vybrané typy modulácie boli QPSK, 8-PSK, 4-QAM a 8-QAM. Výsledky sú spracované v kapitole 8. Ako prvá bola testovaná modulácia 4-QAM. Meranie prebiehalo pre bezturbulentné a turbulentné prostredie, pričom boli použité LD pracujúce na vlnovej dĺžke 850 nm, resp. 1550 nm. Podľa nameraných výsledkov bol vplyv turbulencií menší pri použití vlnovej dĺžky 850 nm. U tejto vlnovej dĺžky klesla úroveň MER len o 0,1 dB, avšak, keďže bolo nameraných veľké množstvo hodnôt, aj takýto malý rozdiel je štatisticky významný. Väčší pokles hodnoty MER bol zaznamenaný pri použití LD pracujúcej na vlnovej dĺžke 1550 nm. Konkrétne to bol pokles o 1,45 dB. Z toho vyplýva, že modulácia 4-QAM je s vlnovou dĺžkou 1550 nm citlivejšia na turbulencie ako keď pracuje s vlnovou dĺžkou 850 nm. Ďalšou moduláciou je 8-QAM. Pre vlnovú dĺžku 850 nm dopadlo meranie podobne ako pri 4-QAM. S nastavením vlnovej dĺžky 1550 nm nastal ešte výraznejší pokles hodnoty MER ako pri 4-QAM. Modulácie QPSK a 8-PSK dopadli veľmi podobne. Rozdiel medzi nimi pri vlnovej dĺžke tvoril len 0,03 dB, keď pre QPSK bol rozdiel medzi prostrediami 0,33 dB a pre 8-PSK to bolo 0,36 dB. Modulácia 8-PSK sa teda javila mierne horšia oproti QPSK pri použití vlnovej dĺžky 850 nm. Pri vlnovej dĺžke 1550 nm tomu bolo naopak. Pre QPSK bol rozdiel hodnôt MER medzi prostrediami 1,43 dB a pre 8-PSK to bolo 1,31 dB. V rámci vlnovej dĺžky 850 nm teda najlepšie obstáli modulácie 4-QAM a 8-QAM. Pre vlnovú dĺžku 1550 nm nastala opačná situácia, keď najlepšou moduláciou sa javí 8-PSK a potom QPSK.

Druhým praktickým meraním bolo testovanie vplyvu hmly na modulovaný optický zväzok. Hmla bola vytváraná sublimáciou suchého ľadu v horúcej vode. Meranie prebiehalo v uzavretom plastovom boxe. Optický zväzok bol modulovaný a demodulovaný rovnako ako pri prvom meraní pomocou USRP prístrojov. Testovanie modulácií prebiehalo s využitím LD pracujúcej na vlnovej dĺžke 1550 nm. Výsledky sú spracované v kapitole 9. Testované modulácie boli rovnaké ako pri meraní s turbulenciami: QPSK, 8-PSK, 4-QAM a 8-QAM. Vyhodnotenie modulácií prebiehalo porovnávaním nábehovej doby prijatého signálu počas rozpadu hmly. Úroveň signálu bola meraná pomocou parametru MER. S každou moduláciou bolo urobených 5 meraní, ktoré sa štatisticky vyhodnotili a výsledky zapísali do tabuľky 9.1. Výsledkom je, že modulácie, ktoré majú rovnaký počet stavov (8-QAM s 8-PSK a 4-QAM s QPSK) nie sú zo štatistického hľadiska rozdielne. Rozdiely nastávajú pri porovnaní modulácií s rozdielnym počtom stavov. Ak sa vezmú čisto len hodnoty priemerov nábehových dôb pre jednotlivé modulácie, najlepšie je na tom 8-QAM a 8-PSK a najhoršie je na tom modulácia QPSK.

Poslednou časťou práce sú simulácie v softvéri Optisystem. Cieľom simulácií bolo zistiť vplyv atmosférických podmienok na modulovaný optický signál a správanie sa

modulovaného zväzku v turbulentnom prostredí. Vplyv atmosférických podmienok (hmla, dážď, sneh a pod.) bol simulovaný pomocou útlmu nastavovanom v komponente FSO kanál. Boli využité tri útlmy: 0,47 dB/km, 4,4 dB/km a 28,9 dB/km. Vplyv turbulencií bol simulovaný pomocou štruktúrneho parametra indexu lomu. Boli vybrané dve jeho hodnoty:  $C_n^2 = 10^{-17}$  (slabá turbulencia) a  $C_n^2 = 10^{-12}$  (veľmi silná turbulencia). Použité vlnové dĺžky boli 850 nm a 1550 nm. Prenosové rýchlosti 155 Mbit.s<sup>-1</sup> a 1,25 Gbit.s<sup>-1</sup>. Výsledky simulácií sú uvedené v kapitole 10. Vyhodnotenie bolo vyhotovené za pomoci parametru BER a porovnanie závislosti kvality FSO spojenia na použitej prenosovej rýchlosti bolo urobené pomocou diagramov oka.

Ako prvá bola testovaná modulácia OOK, s ktorou boli nasadené linkové kódy NRZ, RZ-50% a RZ-33%. Jedným z výsledkov je, že útlm výrazne znižoval dosah spojenia nech už sa jedná o ktorýkoľvek použitý linkový kód. V oboch prostrediach (so slabou aj silnou turbulenciou) dosahovala OOK-NRZ vždy najlepšie výsledky. Z tohto dôvodu bola OOK-NRZ vybraná pre porovnanie s ďalšími dvoma testovanými moduláciami QPSK a 4-QAM.

Pre obe spomínané modulácie bola použitá koherentná aj nekoherentná detekcia. Koherentná QPSK dosahovala výborné výsledky oproti nekoherentnej QPSK a OOK-NRZ pri simuláciách s vlnovou dĺžkou 1550 nm. Avšak, pri použití vlnovej dĺžky 850 nm a prenosovej rýchlosti 155 Mbit.s<sup>-1</sup> sa dosah spojenia koherentnej QPSK vyrovnal nekoherentnej QPSK. Pri prenosovej rýchlosti 1,25 Gbit.s<sup>-1</sup> klesol dosah spojenia dokonca až na úroveň OOK-NRZ.

Modulácia 4-QAM mala pri nastavení vlnovej dĺžky 1550 nm výsledky veľmi podobné modulácii QPSK. Rozdiel nastal pri použití vlnovej dĺžky 850 nm. Dosah nekoherentnej 4-QAM klesol pod hodnotu dosahu pri použití OOK-NRZ. Pri prenosovej rýchlosti 155 Mbit.s<sup>-1</sup> naďalej ostala moduláciou s najväčším dosahom modulácia 4-QAM, avšak, pri prenosovej rýchlosti 1,25 Gbit.s<sup>-1</sup> je dosah koherentnej 4-QAM porovnateľný s OOK-NRZ. V turbulentnom prostredí sa koherentná 4-QAM dostala až pod NRZ-OOK.

Simulácie teda potvrdili výsledky meraní, keď 4-QAM dosahovala horšie výsledky v turbulentnom prostredí ako QPSK. Pri vlnovej dĺžke 1550 nm boli modulácie detegované nekoherentné bez konkurencie, avšak, s použitím vlnovej dĺžky 850 nm sa vyrovnávali a niekedy boli dokonca horšie ako NRZ-OOK.

Keďže je FSO stále vo vývoji, ďalším riešením v tejto problematike by mohlo byť nasadenie rôznych typov modulácií na reálne FSO spojenie, ktoré sa nachádza priamo na VŠB-TU Ostrava. Bolo by tak možné skúmať správanie FSO spojenia v reálnych podmienkach. K tomu by sa určite dala využiť diplomová práca Bc. Martina Chrenšča, ktorý sa zaoberá práve týmto FSO spojením fungujúcim na VŠB-TU Ostrava.

## Použitá literatura

- [1] MAJUMDAR, Arun K. a Jennifer Crider RICKLIN. *Free-space laser communications: principles and advances*. New York, NY: Springer, c2008, x, 417 p. ISBN 9780387286778-
- [2] HENNIGER, Hennes a Otakar WILFERT. An Introduction to Free-space Optical Communications. In: Radioengineering [online]. Praha: Fakulta elektrotechnická ČVUT - Středisko vědeckotechnických informací, 1992- [cit. 2014-10-05]. ISSN 1210-2512. Dostupné z: [http://radioeng.cz/fulltexts/2010/10\\_02\\_203\\_212.pdf](http://radioeng.cz/fulltexts/2010/10_02_203_212.pdf)
- [3] HANZRA, Tejbir Singh. Performance of Free Space Optical Communication System with BPSK and QPSK Modulation. IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering [online]. 2012, vol. 1, issue 3, s. 38-43 [cit. 2014-10-12]. DOI: 10.9790/2834-0133843 Dostupné z: <http://iosrjournals.org/iosr-jece/papers/vol1-issue3/F0133843.pdf>
- [4] ELGANIMI, Taissir Youssef. Performance Comparison between OOK, PPM and PAM Modulation Schemes for Free Space Optical (FSO) Communication Systems : Analytical Study. In: International journal of computer applications [online]. Volume 79 - No. 11, October 2013 [cit. 2014-11-02]. ISSN 0975-8887. Dostupné z: <http://research.ijcaonline.org/volume79/number11/pxc3891838.pdf>
- [5] MAJUMDAR, Arun K. *Advanced free space optics (FSO): a systems approach*. New York: Springer, 2014, xv, 397 s. ISBN 978-1-4939-0917-9
- [6] POPOOLA, Wasiu Oyewole. Subcarrier intensity modulated free-space optical communication systems [online]. Doctoral thesis, Northumbria University, 2009 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://nrl.northumbria.ac.uk/1939/>
- [7] GHASSEMLOOY, Zabih, W. POPOOLA a S. RAJBHANDARI. *Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB*. Boca Raton: CRC Press, 2012, xlii, 517 s. ISBN 978-1-4398-5188-3
- [8] ZHANG, Sen. *Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System*. Kansas. Master Thesis. University of Kansas. Dostupné z: [https://www.ittc.ku.edu/research/thesis/documents/sen\\_zhang\\_thesis.pdf](https://www.ittc.ku.edu/research/thesis/documents/sen_zhang_thesis.pdf)
- [9] KAUR, Amarjeet a Ravinder Kumar PANCHAL. Analysis the effect Atmosphere Turbulence in Free - Space Optical (FSO) Communication Systems. In: International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) [online]. [May 2014] [cit. 2015-01-30]. Volume 3, Issue 11. ISSN 2277 - 3754. Dostupné z: [http://ijeit.com/Vol%203/Issue%2011/IJEIT1412201405\\_53.pdf](http://ijeit.com/Vol%203/Issue%2011/IJEIT1412201405_53.pdf)
- [10] ING. VITÁSEK, Jan, Ph.D. *Vysoká Škola Báňská - Technická Univerzita Ostrava. Optické atmosférické komunikace*. Ostrava, 2014

- [11] Free-Space Optics Propagation and Communication [online]. Hoboken: John Wiley, 2010 [cit. 2015-02-01]. ISBN 978-047-0394-410
- [12] SHAH, Dhaval, Bhavin NAYAK a Dharmendra JETHAWANI. STUDY OF DIFFERENT ATMOSPHERIC CHANNEL MODELS. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRONICS AND COMMUNICATION ENGINEERING & TECHNOLOGY [online]. 2014 [cit. 2015-02-03]. Issue 1, Volume 5. ISSN 0976 – 6472. Dostupné z:  
[http://www.academia.edu/7358784/STUDY\\_OF\\_DIFFERENT\\_ATMOSPHERIC\\_CHANNELS\\_MODELS](http://www.academia.edu/7358784/STUDY_OF_DIFFERENT_ATMOSPHERIC_CHANNELS_MODELS)
- [13] GUPTA, S.C. *TEXTBOOK ON OPTICAL FIBER COMMUNICATION AND ITS APPLICATIONS*. 2. vyd. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2012. ISBN 978-81-203-4580-5
- [14] BORDA, Monica. *Fundamentals in information theory and coding*. Berlin: Springer Verlag, c2011, xxiv, 485 p. ISBN 9783642203473-
- [15] GUIMARÃES, Dayan Adionel. *Digital transmission: a simulation-aided introduction with VisSim/Comm*. London: Springer, 2009, xxvii, 872 p. Signals and communication technology. ISBN 3642013589
- [16] SMITH, David R. *Digital transmission systems*. 3rd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, c2004, xvii, 808 p. ISBN 1402075871.
- [17] FETTE, Bruce Alan. *RF & wireless technologies*. Boston: Newnes/Elsevier, c2008, xix, 827 p. ISBN 9780750685818
- [18] POOJA, Gopal a Kar SUBRAT. Performance of OOK and Variants of PPM in APD based Free Space Optical Communication Systems. 2013. Dostupné z:  
<http://www.photonicsindia.org/Final%20report/PoojaGopal.pdf>
- [19] YOUSSEFELGANIMI, Taissir. Performance Comparison between OOK, PPM and PAM Modulation Schemes for Free Space Optical (FSO) Communication Systems: Analytical Study. *International Journal of Computer Applications* [online]. 2013, vol. 79, issue 11, s. 22-27 [cit. 2015-03-14]. DOI: 10.5120/13786-1838
- [20] GHASSEMLOOY, Z., A.R. HAYES a B. WILSON. Reducing the effects of intersymbol interference in diffuse DPIM optical wireless communications. *IEE Proceedings - Optoelectronics* [online]. 2003, vol. 150, issue 5, s. 445-452 [cit. 2015-03-17]. DOI: 10.1049/ip-opt:20030744
- [21] GROBE, Klaus a Michael EISELT. *Wavelength division multiplexing: a practical engineering guide*. xi, 414 pages. ISBN 9780470623022
- [22] XIONG, Fuqin. *Digital modulation techniques*. 2nd ed. Boston, MA: Artech House, c2006, xxi, 1017 p. Artech House telecommunications library

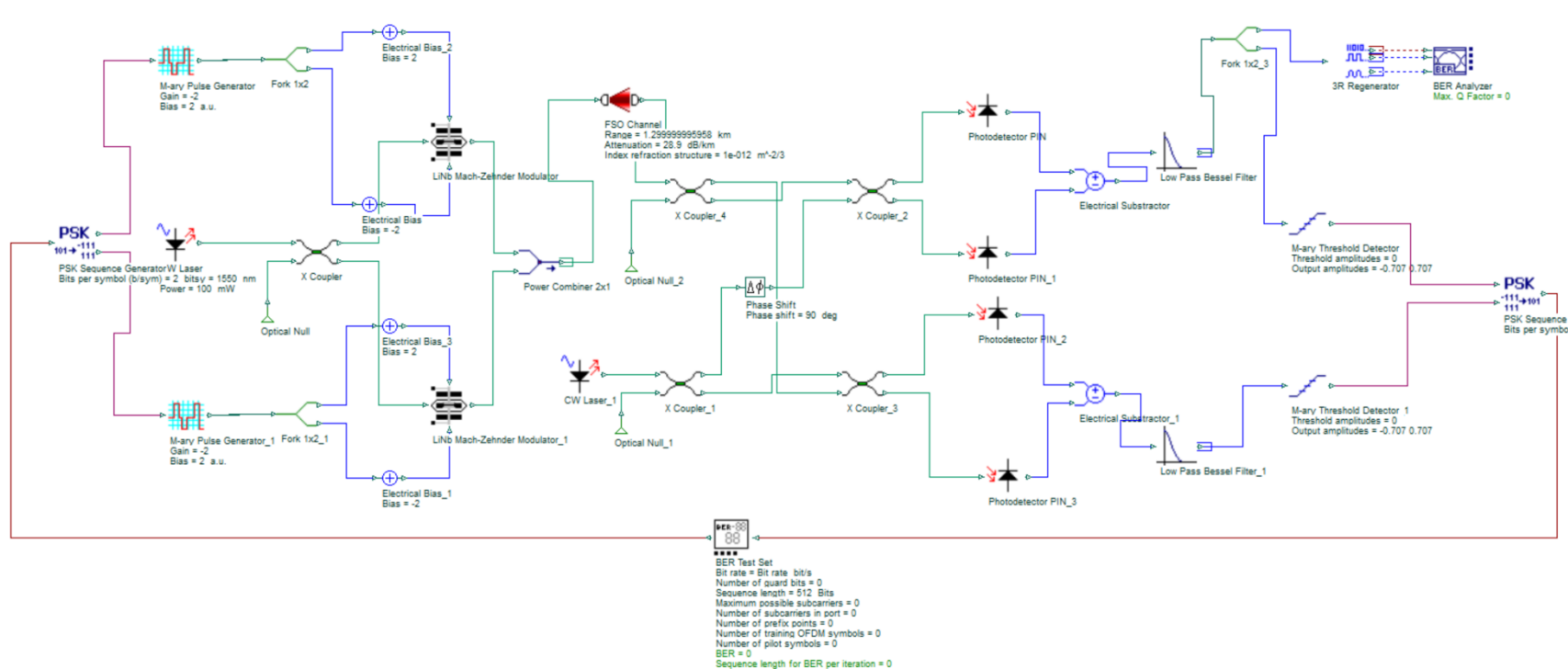


- [23] SINGH HANZRA, Tejbir a Gurpartap SINGH. Improvement in Performance of Free Space Optical Communication. *International Journal of Applied Information Systems (IJ AIS)* [online]. May 2012, No. 4 [cit. 2015-03-31]. Dostupné z: <http://research.ijais.org/volume2/number4/ijais12-450325.pdf>
- [24] RAJENDRAKUMAR, Selvi M. a Murugesan KARRUPPASWAMY. Analysis of Link Availability in FSO - OFDM System under Various Climatic Conditions. *ENGINEERING JOURNAL* [online]. 2015 [cit. 2015-04-03]. DOI: 10.4186/ej.2015.19.1.85. Dostupné z: <http://engj.org/index.php/ej/article/viewFile/563/365>
- [25] ZHAO, Lian, Hari SHANKAR, a Ariel NACHUM. 40G QPSK and DQPSK modulation. Inphi Corporation, Sunnyvale, CA, USA, Tech. Rep, 2007. Dostupné z: <https://www.inphi.com/technology-overview/40G-QPSK-and-DQPSK-Modulation.pdf>
- [26] MARTINEK, Radek a Jan ZIDEK. The Real Implementation of ANFIS Channel Equalizer on the System of Software-Defined Radio. *IETE Journal of Research* [online]. 2014, vol. 60, issue 2, s. 183-193 [cit. 2015-05-04]. DOI: 10.1080/03772063.2014.914698.
- [27] MARTINEK, Radek a Jan ZIDEK. The implementation of channel coding into the digital transmission chain consisting of VSG PXI-5670 - VSA PXI-5661. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2013, vol. 89, issue 7, Warszawa, Poland, s. 64-68 [cit. 2015-05-04]. ISSN 0033-2097.
- [28] MARTINEK, Radek, Jan ZIDEK a Karel TOMALA. BER Measurement in Software Defined Radio Systems. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2013, vol. 89, issue 2B, Warszawa, Poland, s. 205-210 [cit. 2015-05-04]. ISSN 0033-2097.
- [29] MARTINEK, Radek a Jan ZIDEK. The real implementation of NLMS channel equalizer into the system of software defined radio. In *Journal: Advances in Electrical and Electronic Engineering*. December 2012, vol, 10, issue 5, s. 330-336 [cit. 2015-05-04]. VSB - Technical University of Ostrava and University of Zilina Faculty of Electrical Engineering, ISSN 1336-1376, (Print) ISSN 1804-3119 (Online), MK CR E 20146.
- [30] MARTINEK, Radek a Jan ZIDEK. Application of synthetic instrumentation that applies the trend of software-based approach for measuring on the field of modern wireless transfer systems. In *International Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJD IWC)*. Volume 2, Number 3, Published by The Society of Digital Information and Wireless Communications, Kowloon, Hong Kong, 2012. s. 208-221 [cit. 2015-05-04]. ISSN: 2225-658X.
- [31] AL-WOHAISHI, Mohamed, Jan ZIDEK a Radek MARTINEK. Analysis of M State Digitally Modulated Signals in Communication Systems Based on SDR Concept. *IDAACS'11 proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 15-17 September, 2011, Prague, Czech Republic. 2 Vol.* Piscataway: IEEE, 2011. s. 171-175 [cit. 2015-05-04]. ISBN 978-1-4577-1423-8.

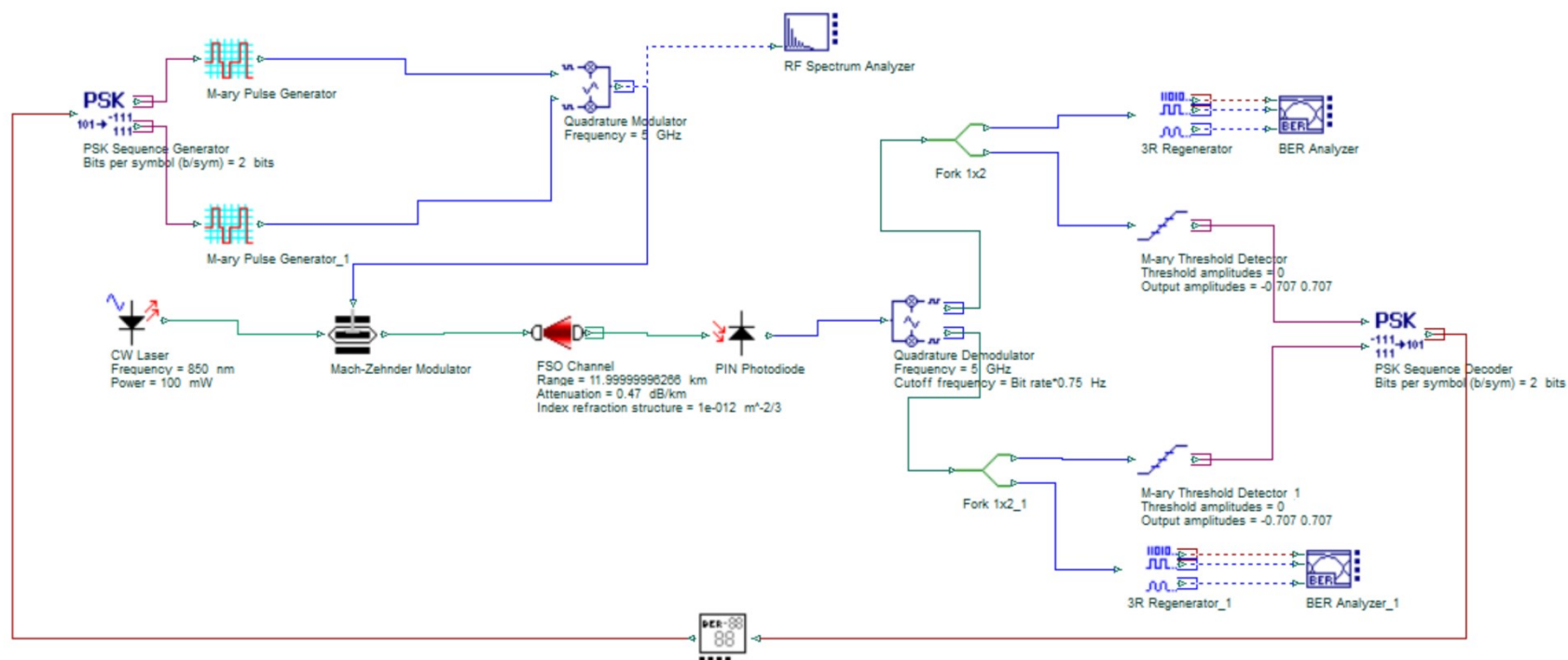
- [32] AL-WOHAISHI, Mohamed, Radek MARTINEK a Jan ZIDEK. Communications in Computer and Information Science, Digital Information Processing and Communications, Part II : In Proceedings of International Conference on Digital Information processing and Communications, ICDIP2011, Ostrava, Czech Republic. 1st Edition, vol. 189, Part 13. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2011. Analysis of M-QAM Data Communication System Using 3D Eye Diagram. s. 337-348 [cit. 2015-05-04]. ISBN 978-3-642-22409-6, ISSN 1865-0929, DOI: 10.1007/978-3-642-22410-2.
- [33] MARTINEK, Radek, Mohamed AL WOHAISHI a Jan ZIDEK. Software Based Flexible Measuring Systems for Analysis of Digitally Modulated Systems. In Conference Proceedings: The 9th Roedunet International Conference, RoEduNet. Sibiu, Romania, 24-26 June 2010, s. 397-402 [cit. 2015-05-04]. ISBN 978-1-4244-7335-9, ISSN 2068-1038.
- [34] MITSUBISHI ELECTRIC. *Datasheet pre LD typu ML925B45F*. May 2004. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorcat/15800/ML925B45F-MFGSpec.pdf>
- [35] THORLABS. *Product Specification Sheet: L850P010*. 2010. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorcat/11900/L850P010-SpecSheet.pdf>
- [36] THORLABS. *PDA10CF-EC - InGaAs Fixed Gain Detector*. 1999-2015. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PDA10CF-EC>
- [37] STATGRAPHIC Centurion XV, verzia 15.2.05
- [38] LITSCHMANNOVÁ, Martina. VŠB – TU OSTRAVA, Fakulta elektrotechniky a informatiky. *Úvod do statistiky* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: [http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/uvod\\_do\\_statistiky.pdf](http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/uvod_do_statistiky.pdf)
- [39] THE LINDE GROUP. *Linde Industrial Gasses: Suchý led* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: [http://www.linde-gas.cz/cs/produkty\\_and\\_zasobovani/suchy\\_led/index.html](http://www.linde-gas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/suchy_led/index.html)
- [40] OPTIWAVE SYSTEMS INC. *Optiwave: Design software for photonics: Optisystem Overview* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://optiwave.com/resources/applications-resources/optical-communication-system-design/>
- [41] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. *Modulation Error Ratio (MER) and Error Vector Magnitude (EVM)*. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/3652/en/>

## Seznam příloh

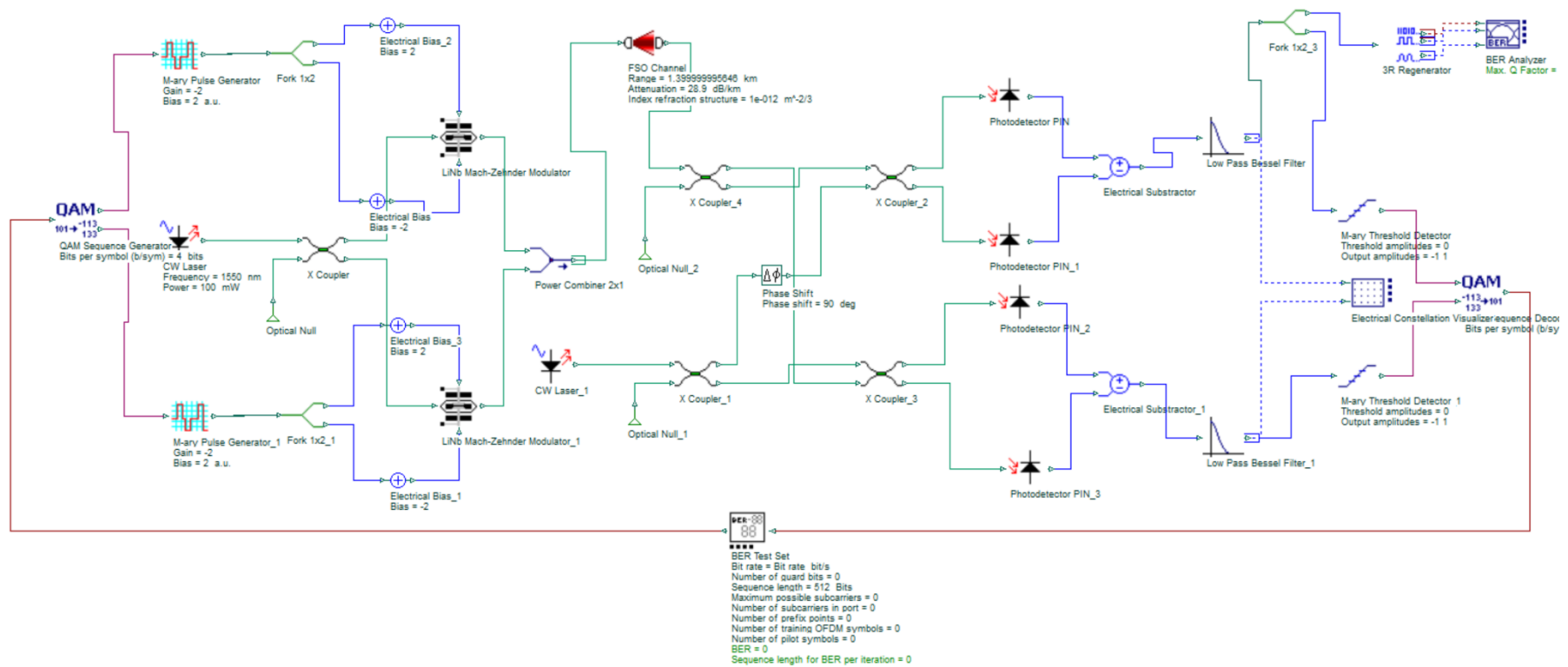
Příloha A:	Schémy zapojenia v softvéri Optisystem .....	I
------------	--	---



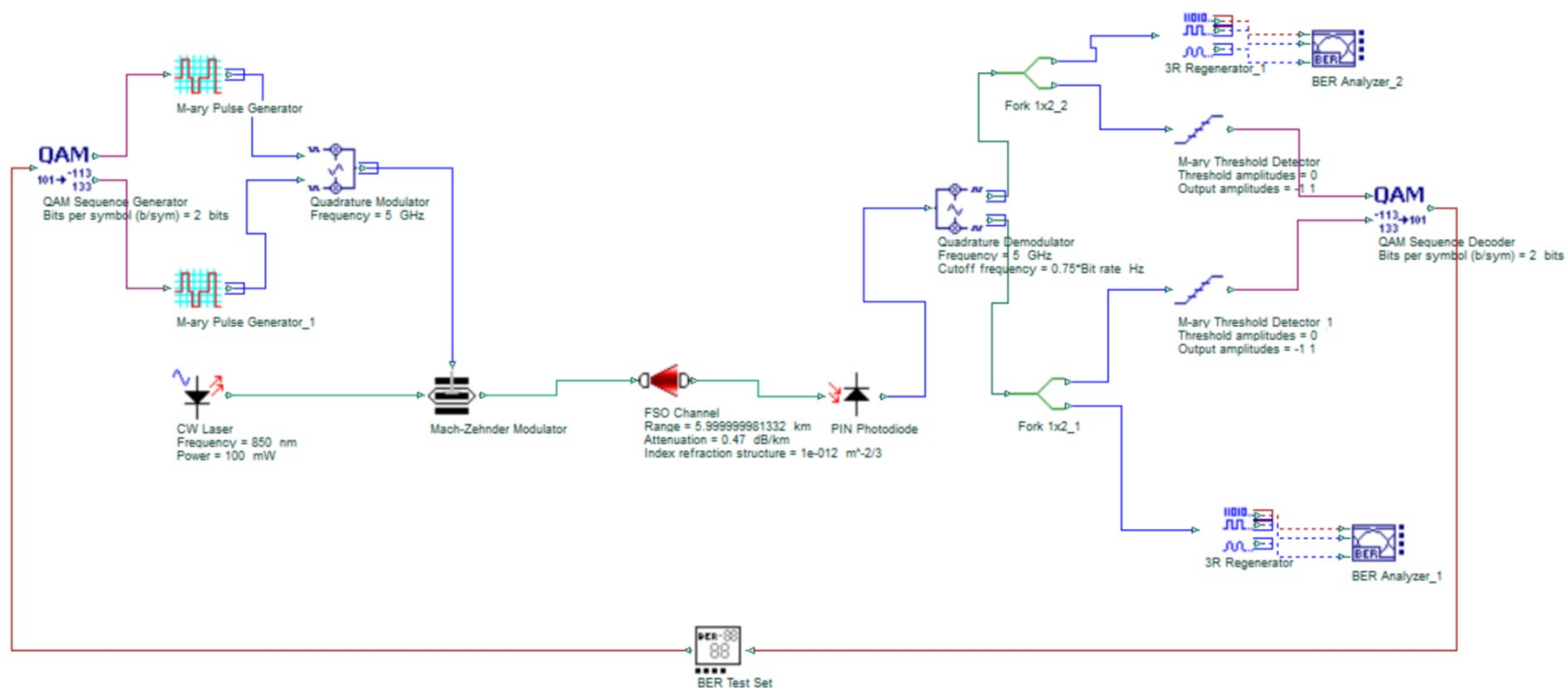
Obrázok A.1: Schéma zapojenia pre moduláciu QPSK s koherentnou detekciou



Obrázok A.2: Schéma zapojenia pre moduláciu QPSK s nekoherentnou detekciou



Obrázok A.3: Schéma zapojenia pre moduláciu 4-QAM



Obrázok A.4: Schéma zapojenia nekoheretne detegovanej 4-QAM v softvéri Optisystem

---